

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DO MARANHÃO
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**Processamento e Caracterização de Absorvedores de Ondas
Eletromagnéticas à Base de Hexaferrita de Bário**

Aluno: Walter da Silva Castro

Orientador: Prof. Dr. Aluísio Alves Cabral Júnior

Co-Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Ribeiro Corrêa

São Luís

2007

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DO MARANHÃO
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

PROCESSAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE ABSORVEDORES DE ONDAS
ELETROMAGNÉTICAS À BASE DE HEXAFERRITA DE BÁRIO

Walter da Silva Castro

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

São Luís

2007

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
DE **WALTER DA SILVA CASTRO**
APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
DE MATERIAIS DO CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DO
MARANHÃO EM 21 DE JUNHO DE 2007

BANCA EXAMINADORA

PROF. DR. ALUÍSIO ALVES CABRAL JUNIOR
ORIENTADOR
CEFET - MA

PROF. DR. RONALDO RIBEIRO CORRÊA
CO-ORIENTADOR
CEFET - MA

PROF. DR. MARCELO MOIZINHO DE OLIVEIRA
CEFET - MA.

PROF. DR. CARLOS WILLIAM DE ARAÚJO PASCHOAL
PPGF - UFMA

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida.

À minha esposa Abilene, pelo apoio e encorajamento em todos os momentos e aos meus filhos Walter e Andressa, pelo amor e compreensão.

Aos meus pais, Guilherme G. de Castro e Celina M. da Silva, pela educação, apoio moral e pelos princípios que levarei por toda a vida. Aos meus irmãos, pelo convívio agradável e ajuda quando necessária.

Aos meus orientadores, professores Aluísio Cabral e Ronaldo Correa, pela confiança, incentivo e suporte nos momentos difíceis da caminhada.

Ao CEFET-MA e a todo o corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais deste Centro, pela oportunidade de realização deste mestrado. À UFSCar, pelo convênio e por oportunizar a realização dos experimentos necessários ao desenvolvimento do trabalho.

À FAPEMA, pelo suporte financeiro e apoio à pesquisa e aos professores do Departamento de Eletroeletrônica do CEFET-MA, pelo apoio na realização deste trabalho.

Ao CLA, em especial aos técnicos e engenheiros do CLA-Raposa, pela ajuda necessária à realização de experimentos durante o desenvolvimento deste trabalho.

A todos os colegas e amigos do mestrado, pelo conhecimento compartilhado nas horas de dúvida. E, finalmente, a todos os amigos que participaram direta ou indiretamente desta grande conquista pessoal.

RESUMO

Os materiais magnéticos desempenham um importante papel na tecnologia moderna, pois encontram um grande número de aplicações em produtos e processos industriais dos mais variados setores. As hexaferritas de bário (HFB) são materiais cerâmicos magnéticos que têm vasta aplicação como magnetos permanentes; sendo utilizados em máquinas elétricas, transformadores, sensores, dispositivos de gravação magnética e em absorvedores de radiação eletromagnética. As propriedades da hexaferrita de bário são fortemente relacionadas à composição e variáveis de processo. Este trabalho teve por objetivos caracterizar a hexaferrita de bário pura, sem adição de dopantes, obtida através da técnica de moagem de alta energia e investigar a influência de algumas variáveis de processamento (poder de moagem e tempo de moagem) e da temperatura, nas propriedades magnéticas e de absorção de microondas, a fim de aplicá-la como material absorvedor de radiação eletromagnética (MARE). Ensaio de Difração de Raios X, para identificação das fases presentes, e de Microscopia Eletrônica de Varredura, para a determinação da morfologia das partículas, foram utilizados. As propriedades magnéticas e dielétricas foram medidas através de um permeâmetro e de um analisador de impedância, respectivamente. Em seguida, as amostras de HFB foram novamente moídas e misturadas com resina de poliéster para formação dos MARE's. As medidas de absorção eletromagnética foram realizadas pelo método de reflectometria em guia de ondas, na faixa de 9,5 a 12GHz.

**PROCESSING AND CHARACTERIZATION OF ELETROMAGNETICS
WAVE ABSORBERS BASED BARIUM HEXAFERRITE**

ABSTRACT

Magnetic materials have an important role in the modern technology because they can be applied in several products and industrial processes of different areas. The barium hexaferrites (HFB) are magnetic ceramic materials that have large applications as permanent magnets, which can be used in electrical machines, transformers, sensors, magnetic media devices and electromagnetic radiation absorbers. The HFB properties are strongly related to the composition and to the variable of process. The objectives of this work were to characterize the pure barium hexaferrite, without dopants, obtained through high energy milling technique and to investigate the influence of some processing variable's (milling power and milling time) and of the temperature in the magnetic and microwaves absorption properties in order to apply it as a electromagnetic radiation absorber material (MARE). Experiments of X-Ray Diffraction, for identification of the phases, and of Scanning Electron Microscopy, for the determination of the morphology of particles, had been used. The magnetic and dielectric properties had been measured through a permeameter and an impedance analyzer, respectively. After that, the samples of HFB were grounded again and mixed with a polyester resin for the formation of MARE' s. The measures of electromagnetic absorption had been carried through by the method of wave guides reflectometer, in the range of 9.5 to 12GHz.

SUMÁRIO

	Pag.
BANCA EXAMINADORA.....	i
AGRADECIMENTOS.....	iii
RESUMO.....	v
ABSTRACT.....	vii
SUMÁRIO.....	ix
ÍNDICE DE TABELAS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	xvii
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1 Processamento e Caracterização de Ferritas.....	3
2.2 Processamento e Caracterização de MARE's.....	7
2.3 Noções de Magnetismo e Transmissão de Sinais.....	23
2.3.1 Campos e Ondas.....	23
2.3.2 Unidades de Transmissão.....	26
2.3.3 Atenuação numa Linha de Transmissão.....	28
2.3.4 Modulação.....	29
2.3.4.1 Modulação AM-DSB.....	30
2.3.4.2 Demodulação AM-DSB.....	31
2.3.4.3 Detector.....	32
2.3.5 Guia de Ondas.....	33
3 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO DE MARE's.....	35
3.1 Técnica RCS.....	35
3.2 Técnica NRL.....	36
3.3 Técnica ATD.....	38
3.4 Técnica de Reflectometria em Guia de Ondas.....	38
4 METODOLOGIA.....	41
4.1 Obtenção do Pó da HFB.....	42

4.1.1 Materiais de Partida.....	42
4.1.2 Processamento dos Pós.....	42
4.1.3 Calcinação.....	46
4.2 Caracterização Física da HFB.....	46
4.2.1 Identificação de Fases.....	47
4.2.2 Área Superficial Específica.....	48
4.2.3 Densidade Aparente e Porosidade.....	49
4.3 Compactação	50
4.4 Tratamento Térmico ou Sinterização.....	51
4.5 Caracterização Microestrutural.....	52
4.6 Caracterização Magnética	53
4.7 Caracterização Dielétrica.....	54
4.8 Caracterização de Absorção ou Refletividade.....	55
5 ANÁLISE DE RESULTADOS.....	57
5.1 Difração de Raio X.....	57
5.1.1 Materiais de Partida e suas Misturas.....	57
5.1.2 Materiais Calcinados	58
5.1.3 Materiais Sinterizados	59
5.2 Área Superficial Específica.....	63
5.3 Densidade e Porosidade.....	64
5.4 Caracterização Microestrutural.....	66
5.5 Caracterização Magnética	74
5.6 Caracterização Dielétrica.....	80
5.7 Caracterização de Absorção.....	84
6 DISCUSSÕES.....	93
7 CONCLUSÃO.....	99
8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	101
8 BIBLIOGRAFIA.....	103

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 Espectro eletromagnético e suas aplicações.....	13
Tabela 2.2 Composição estequiométrica das amostras.....	14
Tabela 2.3 Valores de RCS calculados para uma chapa plana de alumínio.....	17
Tabela 2.4 Fator de correção das principais impedâncias.....	28
Tabela 2.5 Relação faixa de frequência x dimensões dos guias.....	34
Tabela 5.1 Valores de propriedades magnéticas de amostras de HFB sinterizadas à temperaturas de 1100°C, 1200°C e 1300°C.....	78
Tabela 5.2 Valores de permissividade das amostras de HFB.....	81
Tabela 5.3 Valores da tangente de perdas das amostras de HFB.....	83
Tabela 5.4 Propriedades de absorção de OEM dos MARE's.....	90
Tabela 5.5 Propriedades de absorção de OEM das amostras de HFB....	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Diagrama de fases das hexaferritas	5
Figura 2.2 Aeronaves americanas F-117A e B-2	12
Figura 2.3 Níveis de absorção em função da frequência das amostras	14
Figura 2.4 Diagramas de RCS (dBm) de uma placa de alumínio (20cmx17cm) obtidos na frequência de 8GHz	16
Figura 2.5 Gráfico da permeabilidade relativa μ_r dependente da frequência das amostras de $BaFe_{9,5}(Co_{1-y}Ti_y)_{2,5}O_{19}$ com $y = 0,4$ a $0,8$ e sinterizadas por 5h com adição 2% de Bi_2O_3	19
Figura 2.6 Amostras com propriedades de absorção: M1, $\Delta f(-20dB)=370MHz$, $R_{MIN}=-30dB$; M2, $\Delta f(-20dB)=420MHz$, $R_{MIN}=-30dB$ e M3, $\Delta f(-20dB) = 240MHz$, $R_{MIN}=-24dB$	21
Figura 2.7 Onda eletromagnética.....	25
Figura 2.8 Diagrama de bloco de um circuito elétrico.....	26
Figura 2.9 Diagrama de blocos de um modulador AM-DSB	30
Figura 2.10 Forma de onda e espectro de amplitude do sinal modulado	30
Figura 2.11 Diagrama de blocos de um demodulador	31
Figura 2.12 Forma de onda e espectro de amplitude do sinal demodulado..	31
Figura 2.13 Circuito elétrico e símbolo de um detector	32
Figura 3.1 Esquema do método de caracterização RCS.....	36
Figura 3.2 Esquema do arco NRL com os acessórios, mostrando par de cornetas ajustável e a amostra em teste no centro do arco	38
Figura 3.3 Esquema da instrumentação utilizado em ensaios de medidas de refletividade por guia de ondas	40
Figura 4.1 Recipientes com as bolas e os materiais de partida moídos.....	43
Figura 4.2 Moinho Planetário Pulverisette.....	43
Figura 4.3 Difratômetro de Raio X.....	47

Figura 4.4 Amostras de MARE's nos moldes de vidro com dimensões dos guias de ondas.....	50
Figura 4.5 Forno Programável Lindenberg usado na sinterização das amostras.....	52
Figura 4.6 Microscópio Eletrônico de Varredura ZEISS.....	53
Figura 4.7 Permeâmetro Magnetech MRP-1.....	54
Figura 4.8 Instrumentação para medidas de refletividade por guia de ondas.....	56
Figura 5.1 Difratogramas dos materiais de partida e de sua mistura com poderes de moagem de 4:1 e 10:1.....	57
Figura 5.2 Difratogramas dos pós calcinados.....	58
Figura 5.3 Difratogramas das amostras de HFB processadas com PM 4:1, num tempo de 1h e sinterizadas a temperaturas de 1100°C, 1200°C e 1100°C.....	59
Figura 5.4 Difratogramas das amostras de HFB processadas com PM 4:1, num tempo de 10h e sinterizadas a temperaturas de 1100°C, 1200°C e 1100°C.	60
Figura 5.5 Difratogramas das amostras de HFB processadas com PM 10:1, num tempo de 1h e sinterizadas a temperaturas de 1100°C, 1200°C e 1100°C.	61
Figura 5.6 Difratogramas das amostras de HFB processadas com PM 10:1, num tempo de 10h e sinterizadas a temperaturas de 1100°C, 1200°C e 1100°C.	62
Figura 5.7 Área Superficial Específica das Amostras de HFB.....	63
Figura 5.8 Densidade Aparente das amostras de HFB obtidas com poderes de moagem de: a) PM 4:1 b) PM 10:1.....	64
Figura 5.9 Porosidade aparente das amostras de HFB obtidas com poderes de moagem: a) PM 4:1 b) PM 10:1.....	65
Figura 5.10 Micrografias dos pós de HFB, obtidos com os processamentos abaixo: a) PM 4:1, 1h b) PM 4:1, 10h c) PM 10:1, 1h d) PM 10:1, 10h..	66
Figura 5.11 Micrografias das amostras de HFB, obtidas com PM 4:1 em 1h	

e sinterizadas a temperaturas de: a) 1100°C, b) 1200°C e c) 1300°C.....	68
Figura 5.12 Micrografias das amostras de HFB, obtidas com PM 4:1 em 10h e sinterizadas a temperaturas de: a) 1100°C, b) 1200°C e c) 1300°C	69
Figura 5.13 Micrografias das amostras de HFB, obtidas com PM 10:1 em 1h e sinterizadas a temperaturas de: a) 1100°C, b) 1200°C e c) 1300°C.	70
Figura 5.14 Micrografias das amostras de HFB, obtidas com PM 10:1 em 10h e sinterizadas a temperaturas de: a) 1100°C, b) 1200°C e c) 1300°C	71
Figura 5.15 Curvas de histerese de amostras de HFB obtidas com PM 4:1 em 1h e sinterizadas: a) 1100°C, b) 1200°C, c) 1300°C.....	74
Figura 5.16 Curvas de histerese de amostras de HFB obtidas com PM 4:1 em 10h e sinterizadas: a) 1100°C, b) 1200°C, c) 1300°C.....	75
Figura 5.17 Curvas de histerese de amostras de HFB obtidas com PM 10:1 em 1h e sinterizadas: a) 1100°C, b) 1200°C, c) 1300°C.....	76
Figura 5.18 Curvas de histerese de amostras de HFB obtidas com PM 10:1 em 10h e sinterizadas: a) 1100°C, b) 1200°C, c) 1300°C.....	77
Figura 5.19 Permissividade relativa das amostras de HFB em função da freqüência obtidas com PM's 4:1 e 10:1, em tempos de 1h e 10h.....	80
Figura 5.20 Curvas da tangente de perdas em função da freqüência das amostras de HFB, processadas com PM 4:1.....	82
Figura 5.21 Curvas da tangente de perdas em função da freqüência das amostras de HFB, processadas com PM 10:1.....	82
Figura 5.22 Níveis de absorção dos MARE's e refletor versus freqüência, obtidas no processamento PM 4:1, 1h, nas temperaturas de : a) 1100°C, b) 1200°C, c) 1300°C.....	85
Figura 5.23 Níveis de absorção dos MARE's e refletor versus freqüência, obtidas no processamento PM 4:1, 10h, nas temperaturas de : a) 1100°C, b) 1200°C, c) 1300°C.....	86
Figura 5.24 Níveis de absorção dos MARE's e refletor versus freqüência, obtidas no processamento PM 10:1, 1h, nas temperaturas de : a) 1100°C, b) 1200°C, c) 1300°C.....	87
Figura 5.25 Níveis de absorção dos MARE's e refletor versus freqüência, obtidas no processamento PM 10:1, 10h, nas temperaturas de : a) 1100°C,	

b) 1200°C, c) 1300°C.....	88
Figura 5.26 Níveis de absorção das Amostras hexaferrita de bário e refletor versus frequência, conforme o processamento: a) PM 4:1, 1h, b) PM 10:1, 1h, c) PM 10:1, 10h.....	91

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A	Área de seção transversal de um corpo
B	Indução magnética
BaCO ₃	Fórmula química do carbonato de bário
BaFe ₁₂ O ₁₉	Fórmula química da hexaferrita de bário
B _r	Remanência
C	Capacitância
E	Campo elétrico
E _A	Energia absorvida ou atenuada
E _I	Energia incidente
E _R	Energia refletida
E _T	Energia transmitida
Fe ₂ O ₃	Formula química da hematita
H	Intensidade de campo elétrico
H _C	Coercividade
HFB	Hexaferrita de bário
K	Fator de correção de impedâncias em dB
L	Indutância
M	Magnetização
M _s	Magnetização de saturação
M _I	Massa da amostra imersa
M _S	Massa da amostra a seco
M _U	Massa da amostra úmida
MARE	Material absorvedor de radiação eletromagnética
MAE	Moagem de alta energia
MPa	Mega Pascal
PM	Poder de moagem
PVA	Álcool polivinílico
OEM	Ondas eletromagnéticas
R	Perda por reflexão

RCS	Seção reta radar
T	Temperatura
T_C	Temperatura de Curie
X	Reatância
Z	Impedância
a	Comprimento
b	Largura
c	Velocidade da luz no vácuo
d	Espessura
dB	Decibel
dBu	Nível de tensão com relação a 0,775V
dBm	Nível de potência com relação a 1mW
f	Frequência
$\tan\delta$	Tangente de perdas
ϵ'	Permissividade dielétrica real
ϵ''	Permissividade dielétrica imaginária
ϵ_r	Permissividade relativa ou constante dielétrica
ϵ_0	Constante dielétrica no vácuo
θ	Ângulo de difração
ρ	Densidade em gramas por centímetros cúbicos
μ_0	Permeabilidade no vácuo
μ_r	Permeabilidade relativa
μ'	Permeabilidade magnética real
μ''	Permeabilidade magnética imaginaria
σ	Seção Reta Radar
λ	Comprimento de onda
ω	Frequência angular

1 INTRODUÇÃO

Os materiais magnéticos desempenham um importante papel na tecnologia moderna, pois encontram um grande número de aplicações em produtos e processos industriais dos mais variados setores. As ferritas hexagonais são materiais magnéticos cerâmicos, constituídos de ferro, oxigênio e outro metal e são obtidas através da mistura do óxido de ferro com outros óxidos na forma de pós. Estes materiais têm vasta aplicação como magnetos permanentes, sendo utilizados em motores, geradores, transformadores e dispositivos de gravação magnética, e também como absorvedores de radiação eletromagnética, em dispositivos que requerem o controle do nível da radiação eletromagnética, utilizados nos setores de aeronáutica, espacial, telecomunicações e médico. Atualmente em qualquer dispositivo eletroeletrônico que necessite de um magneto permanente, as hexaferritas de bário (HFB) encontram aplicação, devido à sua alta coercividade e baixo custo de produção, aplicabilidade em altas frequências, resistência ao calor e à corrosão. As hexaferritas de bário passaram a ser usadas recentemente na forma nanoestrutural, como um material de alta densidade, obtido por moagem de alta energia (MAE). A MAE produz nanoestruturas devido à atuação das forças de impacto e cisalhamento no pó, que resultam na redução do tamanho da partícula.

Em decorrência dos avanços tecnológicos, o uso da radiação eletromagnética na faixa de microondas tem se tornado intenso nos últimos anos, principalmente na área de telecomunicações, como nos setores de telefonia celular, antenas de transmissão e recepção e sistemas de comunicação e de segurança empregados em aeronaves, navios, automotivos e outros. Como consequência, o nível de ruído dessa radiação no meio ambiente tem aumentado de maneira contínua. Com o objetivo de eliminar ou atenuar os níveis de radiação eletromagnética, em diferentes ambientes, tem ocorrido uma grande expansão no desenvolvimento de materiais que possuam a característica de absorver a radiação incidente, transformando-a em energia térmica.

Os materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE's), em geral, são constituídos de materiais dielétricos e/ou magnéticos, que promovem alta perda de energia em determinadas faixas de frequências. O emprego destes materiais tornou-se um dos campos mais fascinantes da engenharia de materiais e tem recebido muita atenção nas últimas décadas, devido às crescentes exigências das legislações governamentais no controle de níveis de radiação eletromagnética espúria, emitida por equipamentos eletrônicos, das normas industriais de compatibilidade e interferência eletromagnética envolvendo as indústrias de equipamentos eletroeletrônicos e telecomunicações, bem como pela demanda da sociedade na confiabilidade dos equipamentos eletrônicos. No entanto, o acesso à tecnologia de obtenção de MARE's é limitado, por estar intimamente ligado a uma área estratégica, como às de obtenção de estruturas de baixa detecção radar, ou tecnologia "Stealth". As informações existentes na literatura atual sobre estes materiais se resumem a conceitos genéricos, dispositivos tradicionais e divulgação do potencial das aplicações desse material.

Reconhecendo a importância das atividades de pesquisa no domínio do conhecimento desta área, este trabalho tem por objetivo o processamento e caracterização da hexaferrita de bário, sem utilização de dopantes, utilizando a técnica de MAE, investigando a influência das variáveis deste processamento no controle da microestrutura e, conseqüentemente, das propriedades magnéticas e de absorção das radiações eletromagnéticas, a fim de aplicá-la como MARE. A caracterização de absorção das ondas eletromagnéticas (OEM) das amostras de MARE's, foi feita pelo método de reflectometria em guia de ondas, devido aos equipamentos existentes no laboratório de microondas do CEFET-MA e à disponibilidade dos instrumentos do Centro de Lançamento de Alcântara –Raposa – MA.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Os materiais magnéticos são bastante usados no desenvolvimento de novas tecnologias, como em sistemas de geração e distribuição de energia, sistemas de conversão eletromecânica, na eletrônica e telecomunicações, informática, automação industrial até na medicina e na engenharia biomédica. Esta vasta aplicação tem sido possível graças ao entendimento dos fenômenos magnéticos, que passaram a ser melhor compreendidos, a partir do século XIX, com a descoberta de sua correlação com a eletricidade. Isto proporcionou, também, a descoberta de novos materiais magnéticos. As ferritas hexagonais são materiais magnéticos cerâmicos que absorvem energia de microondas, por apresentarem uma significativa permeabilidade, uma alta magnetização de saturação e comportamento planar anisotrópico em altas frequências [1-2].

Como o objetivo do presente trabalho foi processar a HFB por MAE, investigar as suas propriedades visando sua aplicação como MARE e caracterizar a absorção de microondas pelo método de reflectometria em guia de ondas, para um melhor entendimento deste trabalho, dividiu-se este capítulo em três subitens: processamento e caracterização de ferritas; materiais absorvedores de radiação eletromagnética e noções de magnetismo e transmissão de sinais.

2.1 PROCESSAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE FERRITAS

As ferritas são materiais cerâmicos magnéticos que se obtém misturando óxido de ferro como componente principal, com outros óxidos na forma de pós. Os pós são prensados, conformados e sinterizados a altas temperaturas. As ferritas, constituídas à base de Fe_2O_3 , são os materiais mais utilizados na tecnologia de processamento de materiais absorvedores de radiação. As propriedades das ferritas, que afetam as suas aplicações no processamento de MARE's, são as relacionadas às propriedades intrínsecas, como a permeabilidade, permissividade, saturação magnética e a temperatura de Curie, somadas às suas características microestruturais, como porosidade e

tamanho de grãos [3]. O tamanho, a porosidade e os contornos de grãos influenciam a estrutura dos domínios, a largura e a mobilidade das paredes de domínios. Estas propriedades magnéticas podem ser modificadas pela microestrutura, que pode ser controlada pela variação no processamento, isto é, preparação do pó, moagem e condições de sinterização e por introdução de dopantes [4].

As ferritas hexagonais são representadas pela fórmula, $AB_{12}O_{19}$ onde A é um material divalente como o bário, o chumbo ou o estrôncio, e B é um metal trivalente tal como o alumínio, o gálio, o cromo ou o ferro. Exemplos de ferritas hexagonais: $PbFe_{12}O_{19}$ e $BaFe_{12}O_{19}$. A hexaferrita de bário é atualmente a ferrita mais utilizada na manufatura de ímãs permanentes, devido, ao baixo custo, à alta anisotropia magnetocristalina, alto campo coercivo, alta magnetização de saturação, excelente estabilidade química e alta resistividade elétrica [5]. A substituição de Fe^{3+} e Ba^{2+} é um efetivo método de variar as propriedades magnéticas da hexaferrita de bário. Recentemente, muitos trabalhos têm sido feitos para modificar os parâmetros magnéticos baseados na substituição de Fe^{3+} com outros cátions ou combinações de cátions como: Cr^{3+} , Al^{3+} , Co^{2+} - Ti^{4+} , Zn^{2+} - Zr^{4+} e assim por diante [6].

A seguir, relacionamos alguns artigos de trabalhos feitos com vários tipos de ferritas, que demonstram as mudanças nas propriedades de acordo com o tipo de processamento e algumas aplicações deste material.

De acordo com Pardavi [7], o processamento de sinais exige dispositivos de microondas de banda larga, com baixas perdas e baixo custo (como por ex: circuladores, isoladores, absorvedores de microondas). Existe um aumento na demanda destes dispositivos para processamento de sinais na detecção de radar, comunicações e instrumentação. A tecnologia de microondas está crescendo cada vez mais para altas frequências (até 100GHz) a grandes larguras de bandas. As ferritas moles são largamente utilizadas na fabricação destes dispositivos, devido à elevada resistividade em altas frequências, flexibilidade na adequação das propriedades magnéticas, fácil preparação e baixo preço. Estas considerações fazem das ferritas o material de maior preferência para aplicações em microondas, sendo que uma grande

atenção foi dedicada às ferritas hexagonais como materiais para aplicações em microondas, na faixa de 1GHz a 100GHz. As estruturas cristalina e magnética dos diversos tipos de hexaferritas denotadas de M, W, Y e Z [8], são extraordinariamente complexas, mas todos os tipos são inter-relacionados pela razão $(\text{BaO}+\text{MeO})/\text{Fe}_2\text{O}_3$, que pode ser 1/6 (M), 3/8 (W), 4/6 (Y) e 5/12 (Z), como pode ser visto no diagrama de fases da figura 2.1.

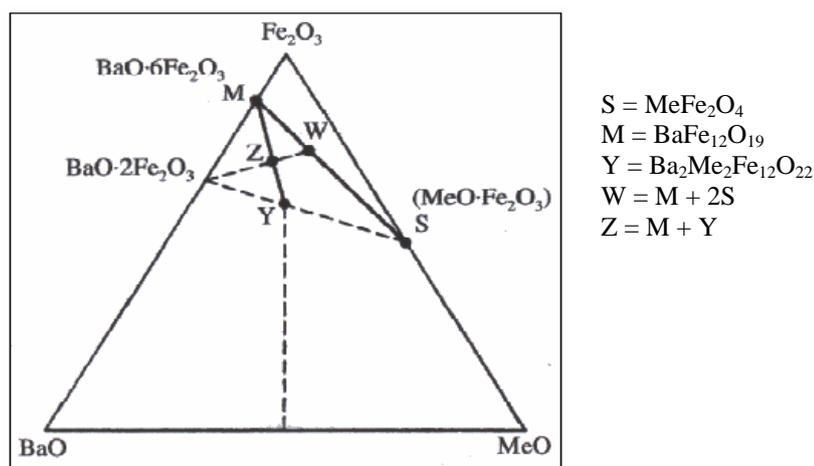


Figura 2.1 Diagrama de fases das hexaferritas [7,11].

Pardavi estudou as ferritas para aplicações em microondas, as tecnologias de preparação das ferritas, suas propriedades em alta frequência e sua aplicação em dispositivos de microondas. Observou que propriedades como a permeabilidade dos materiais magnéticos em altas frequências difere consideravelmente do comportamento estático ou a baixas frequências, ou seja, nas frequências mais baixas, essa interação é pequena e as perdas por correntes parasitas devem ser desprezíveis. Entretanto, nas altas frequências, a interação causa um fenômeno único (ressonância), permitindo a aplicação das ferritas em dispositivos de microondas. Ela afirmou ainda que, embora a tecnologia das ferritas moles já esteja amadurecida para aplicações tradicionais em componentes discretos, existem problemas a serem superados para que possam garantir a utilização de ferritas a baixo custo, em sistemas de produção de massa, como comunicações móveis, sensores automotivos e circuitos de consumo.

Para Reis [9], as propriedades magnéticas dos materiais magnéticos moles (MMM) ou permeáveis são fortemente influenciadas pelo movimento das paredes de domínios magnéticos cuja estrutura é dependente das características do pó (morfologia, estado de agregação, tamanho e distribuição de partícula), da composição e das variáveis de processamento como: pressão de compactação, temperatura, tempo e atmosfera de sinterização. Ele também obteve ferritas de Ni-Zn com composição $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$, pelo método de síntese por reação de combustão. As amostras foram compactadas uniaxialmente e sinterizadas à temperatura de 1200°C , com tempos de 1, 2 e 3 horas. As amostras foram caracterizadas por densidade aparente, através do qual se observou que houve um aumento moderado da densidade; DRX (Difração de Raios X), em que se apresentou a formação completa da fase cristalina ferrita Ni-Zn, MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura), em que verificou microestruturas homogêneas, com grãos de formato aproximadamente hexagonais e com um leve aumento no tamanho de grão, de acordo com o aumento do tempo de sinterização e também foram feitas, medidas magnéticas através dos parâmetros de histerese (coercividade, remanência, densidade de fluxo máximo, perda por histerese e permeabilidade máxima). Os resultados mostraram que o aumento do tempo de sinterização não causou mudanças significativas na microestrutura e nas propriedades magnéticas, porém, levou a um pequeno crescimento do tamanho médio dos grãos e redução da porosidade, indicando que o tempo de sinterização de 1 hora foi suficiente para a obtenção da microestrutura e propriedades magnéticas desejadas.

Em 2005, Gheno [10] descreveu as hexaferritas de bário como óxidos ferrimagnéticos hexagonais de grande interesse científico, tecnológico e industrial para aplicações como magneto permanente. Ele processou a hexaferrita de bário por moagem de alta energia (MAE), seguido de tratamento térmico, e obteve as imagens do comportamento magnético por microscopia de força magnética (MFM), com campo magnético externo aplicado progressivamente. Os óxidos de partida foram misturados em proporções estequiométricas por 10 minutos em moinho planetário. A mistura foi calcinada

a 1000°C para obtenção da fase hexaferrita de bário e depois moída em moinho de alta energia com poder de moagem de 4:1 em um tempo de 10 horas. O produto da moagem foi compactado uniaxialmente em pastilhas e sinterizado a 1300°C por 1 hora e posteriormente foi tratado termicamente a 1000°C por 1 hora para aumentar e revelar ainda mais os grãos. Os resultados mostraram que o contraste observado nas imagens MFM depende da intensidade dos domínios magnéticos, os quais se tornam mais intensos e organizados nas hexaferritas com o aumento da intensidade do campo magnético aplicado.

Nesse mesmo ano, Correa [11] caracterizou elétrica e magneticamente a hexaferrita de bário, processada por MAE. Nesse trabalho, foram modificados vários parâmetros do processamento, como: poder de moagem, tempo de moagem e temperatura de sinterização das amostras, o que permitiu obter mudanças na microestrutura e, conseqüentemente, nas suas propriedades. As caracterizações elétrica e magnética foram feitas por espectroscopia de impedância e microscopia de força atômica (MFA). Foi constatado que a obtenção da hexaferrita de bário, por este método de processamento, apresentou-se flexível, na medida em que vários parâmetros nas condições de moagem puderam ser manipulados para que se pudesse ter uma estrutura que resultasse em boas propriedades. Concluindo que para melhoria das propriedades da HFB, é muito importante desenvolver-se uma microestrutura uniforme, com grãos pequenos e bem distribuídos e que a moagem de alta energia permitiu obter essas propriedades, variando as condições de moagem e temperatura de sinterização e possibilitando um amplo limite de escolha das propriedades para diversas aplicações.

2.2 PROCESSAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE MARE's

Os Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética (MARE's) são compostos por materiais dielétricos e/ou magnéticos, que apresentam elevada perda de energia ao absorverem radiação incidente em frequências

sintonizadas e dissipam a energia absorvida sob a forma de calor, ou seja, esses materiais ao serem atingidos por uma onda eletromagnética possuem estrutura molecular excitada e a energia incidente é convertida em calor [12-14]. Os MARE's são revestimentos que podem ser utilizados sob a forma de espumas, borrachas ou resinas, cujas propriedades elétricas e magnéticas podem ser alteradas por intermédio da mistura de polímeros com cargas específicas, de forma a propiciar ao material final, características adequadas à absorção de radiação eletromagnética em determinadas faixas de frequência.

Os avanços na tecnologia de uso de comunicações sem fios e sistemas de radar, acarretaram um aumento significativo nos níveis de radiação eletromagnética, fazendo-se necessário proteger dispositivos eletrônicos e humanos dos efeitos dessa irradiação. Nas últimas décadas, vários países têm desenvolvido a tecnologia de fabricação de estruturas com reduzida detecção por radar para emprego aeroespacial. O emprego de materiais adequados e de geometria apropriada permite que uma aeronave tenha sua seção reta radar (RCS) reduzida, devido ao decréscimo da refletividade das ondas eletromagnéticas incidentes no alvo (Tecnologia Stealth). Os primeiros trabalhos no desenvolvimento de materiais absorvedores de radiação datam da II guerra mundial quando os EUA, Alemanha e Inglaterra desenvolveram projetos inicialmente para aplicações navais. Durante a II grande guerra, os alemães usaram placas de borracha natural preenchido com negro de fumo para cobrir os periscópios dos seus submarinos. Os EUA desenvolveram um absorvedor chamado manta HARP (Halpern Anti-Radiation Paint) composta de amostras condutoras de cobre, alumínio em uma matriz de borracha. Em 1947, os ingleses desenvolveram um absorvedor denominado DX1 a base de borracha natural e partículas de carbono. Na década de 60, durante a guerra fria, vários projetos de pesquisas foram desenvolvidos nessa área, visando reduzir a seção reta radar de aeronaves ou mísseis, empregando a tecnologia stealth, dentre os quais os mais conhecidos do público em geral são as aeronaves F-117A e o B2 (Figura 2.2).

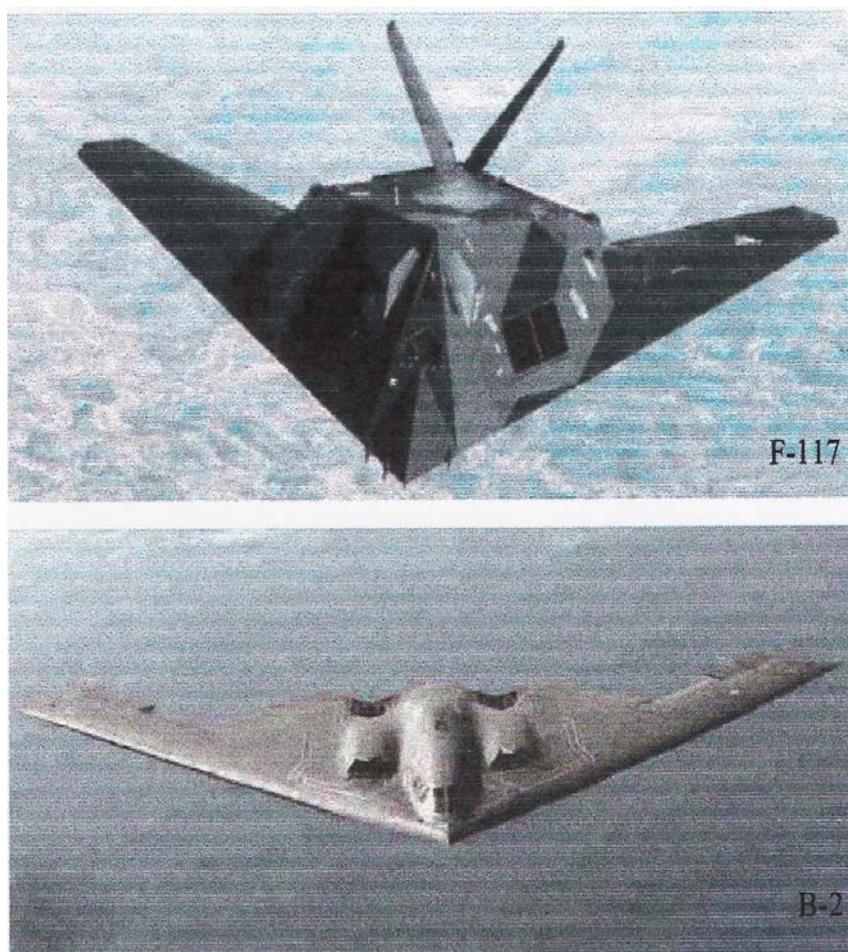


Figura 2.2 Aeronaves americanas F-117A e B-2 [28].

A absorção da energia eletromagnética está relacionada ao fenômeno da ressonância, que é o termo utilizado para denominar a faixa de frequência do espectro eletromagnético, onde o material apresenta maior absorção da onda eletromagnética. O estudo dos MARE's aumentou muito nos últimos anos com o desenvolvimento dos radares, tecnologia das comunicações em microondas, necessidade de camadas anti-interferência, tecnologia de auto-ocultação e câmaras de microondas.

Existem duas categorias de MARE's:

- Absorvedores Dielétricos: a partir da adição de pequenas partículas de carbono, grafite, em uma matriz polimérica.
- Absorvedores Magnéticos: pela adição de partículas com características magnéticas, como as ferritas, em uma matriz polimérica.

E são várias as aplicações para os MARE's, dentre as quais estão:

- Revestimento de câmeras anecóicas para ensaios eletromagnéticos
- Blindagem de ambientes com fontes intensas de RF danosas ao tecido humano;
- Antenas de alto desempenho;
- Controle de interferência eletromagnética;
- Redução da seção reta radar (RCS) de aeronaves e artefatos;
- Blindagem de fornos de microondas.

Um MARE ideal deve apresentar como características principais a durabilidade, baixa densidade, baixo custo, alta permeabilidade, abrangência em uma ampla faixa de frequência e ser de fácil aplicação, além de resistência à atmosfera salina, possibilitando seu uso em aplicações navais [15].

As ferritas apresentam perdas dielétricas e magnéticas. Nos MARE's baseados em aditivos magnéticos, o mecanismo de absorção das ondas eletromagnéticas é mais complexo em relação aos materiais dielétricos. As perdas magnéticas estão relacionadas com o alinhamento e a rotação do spin de magnetização dentro dos domínios magnéticos. Devido à série de eventos simultâneos que ocorrem na estrutura da ferrita durante a interação com a onda eletromagnética, não é possível isolar o armazenamento e perdas dielétricas e magnéticas para uma análise dos parâmetros complexos em função da frequência, por causa da sobreposição dos fenômenos. O momento magnético dos átomos é devido ao momento orbital dos elétrons em torno do núcleo e ao spin do elétron em torno do seu eixo. Quando um campo magnético externo é aplicado em um material com propriedades magnéticas, algumas de suas regiões alinham os seus momentos magnéticos atômicos paralelamente em uma única direção, constituindo assim os denominados domínios magnéticos do material. Estes domínios, que possuem momento de spin, crescem por influência de outros vizinhos, podendo sofrer rotação no sentido do momento de rotação (spin) para alinharem-se com o campo magnético aplicado. Dessa forma, as propriedades magnéticas são devidas ao ordenamento dos momentos dos dipolos magnéticos das espécies que constituem o material. O comportamento de uma ferrita típica em altas

freqüências mostra que a permissividade permanece praticamente constante em uma larga faixa de freqüências, enquanto a permeabilidade varia sensivelmente, diminuindo seus valores com o aumento da freqüência, como pode ser vista na figura 2.3, podendo ainda variar com a composição química da ferrita. Essas variações do comportamento é que definem o potencial de aplicação de uma determinada ferrita como um grande absorvedor de radiação, ou seja, as variações da permissividade e permeabilidade e, conseqüentemente, a sua impedância com a freqüência são os parâmetros que explicam porque determinados aditivos são mais eficientes que outros no processamento de um MARE [16].

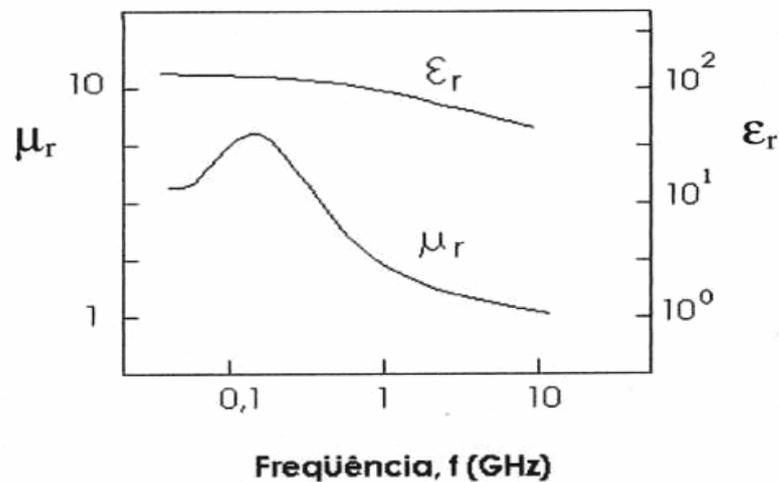


Figura 2.3 Variação de ϵ_r e de μ_r de uma ferrita típica com a freqüência [16].

Para o estabelecimento de metodologias confiáveis de caracterização eletromagnética de um MARE, os parâmetros a serem avaliados compreendem, basicamente, o coeficiente de reflexão e os valores complexos de permeabilidade ($\mu' - i\mu''$), permissividade ($\epsilon' - i\epsilon''$) e tangente de perdas ($\tan\delta$), que determinam as características de absorção [17-19]. A parte real da permissividade e permeabilidade complexas (ϵ' , μ') representa a capacidade de armazenamento de energia elétrica e magnética e a parte imaginária (ϵ'' , μ'') da permissividade e permeabilidade complexas representa as perdas de energia elétrica e magnética.

Em 1993, Shin e Oh [20] investigaram as dispersões da permeabilidade complexa e o fenômeno da absorção de microondas das ferritas absorvedoras de microondas. As permeabilidades complexas das ferritas hexagonais (tipos Y e Z) e espinélio (NiZn e NiZnCo) foram medidas na faixa de 200MHz a 16GHz. As amostras de compósitos tiveram o pó de ferrita, misturado com borracha de silicone numa forma toroidal, com a razão da mistura de pó ferrita/borracha em peso fixado em 4, que é equivalente a 43% do percentual do volume da ferrita e porque esta taxa de mistura produz uma correspondente espessura fina e alta flexibilidade. A permeabilidade complexa ($\mu_r' - \mu_r''$) e a permissividade complexa ($\epsilon_r' - \epsilon_r''$) do material que constitui o absorvedor de microondas determinaram as características de atenuação e reflexão do material e foram medidas por um analisador de redes HP8720B. Foi constatado que a permeabilidade complexa do absorvedor é dependente da frequência, mas a permissividade complexa é quase constante. Nestes corpos de ferritas, a maior perda foi atribuída principalmente às perdas magnéticas enquanto as perdas dielétricas foram desprezíveis. A perda por reflexão pode ser calculada no caso de um metal ser coberto por apenas uma camada de absorvedor, sendo que a impedância de entrada normalizada na superfície é descrita por:

$$Z = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh\left(\frac{2\pi f d}{C} \sqrt{\epsilon_r \mu_r}\right) \quad (2.1)$$

onde μ_r é a permeabilidade complexa ($\mu_r' - j\mu_r''$), ϵ_r a permissividade complexa ($\epsilon_r' - \epsilon_r''$), C é a velocidade da luz no vácuo, f a frequência de operação e d é a espessura do absorvedor. Desde que a perda por reflexão R em decibéis é uma função da impedância de entrada na superfície do absorvedor Z, [21-27], ela pode ser expressa por:

$$R(dB) = 20 \log_{10} \frac{(Z - 1)}{(Z + 1)} \quad (2.2)$$

Desta forma, para a produção de um bom absorvedor deve-se ter o menor valor possível de R, numa faixa de frequência mais ampla possível.

Em 2001, Nohara [28] desenvolveu a caracterização eletromagnética de materiais absorvedores multicamadas de microondas pela técnica NRL (Naval Research Laboratory) e de guia de ondas. Ele estudou o comportamento da absorção dos MARE's à base de MnZn, aplicados em substratos com diferentes geometrias: placa plana, diedro e triedro (alumínio) na faixa de 8 a 12 GHz (banda X). Os MARE's foram caracterizados via refletividade pelas técnicas acima, onde um modelo teórico de absorvedor de multicamadas foi desenvolvido a partir do método da linha de transmissão, juntamente com o desenvolvimento de um algoritmo. Isto permitiu a implantação de um software para obter a refletividade em função da frequência para materiais com parâmetros eletromagnéticos pré-selecionados. Por meio de um algoritmo que faz previsões de características de refletividade dos materiais sob incidência normal de ondas, e no qual são lançados as permissividades de cada camada do absorvedor, suas espessuras e o número total de camadas, foram realizadas simulações de reflexão de ondas nos absorvedores de multicamadas, tendo-se observado que a refletividade depende da estrutura intrínseca, da forma e da espessura do material. Adicionalmente, constatou-se que há uma correlação entre a permissividade elétrica complexa dos MARE's, com o desempenho da refletividade dos mesmos.

A supressão de microondas refletidas por estruturas metálicas encontra importantes aplicações civis e militares. No setor civil, é empregado como revestimentos de câmeras anecóicas, antenas de alto desempenho, controle de interferência eletromagnético, blindagem de fornos de microondas, remoção de imagens fantasmas de televisores etc. No setor militar, de modo a dificultar ou minimizar a detecção por sistemas de radares, exemplos bem sucedidos de MARE podem ser encontrados na aeronáutica em estruturas de baixa detecção por sistemas de radar como a aeronave F-117A e o bombardeiro B-2, da força aérea dos EUA, aeronaves MIG da força aérea russa etc; na marinha, em embarcações furtivas, como os navios Sea Shadow (EUA), fragata DE-229 (Japão) e até no submarino russo Kursk naufragado em 12/08/2000.

Normalmente, os radares de um sistema de vigilância e defesa anti-aérea baseado em solo operam nas bandas designadas por UHF, L, S, C e X, conforme tabela [2.1]. Os radares realizam primeiramente a varredura do espaço aéreo, utilizando as bandas UHF, L, S e C, uma vez que permitem cobrir grandes distâncias. A banda X, cuja faixa de frequência vai de 8GHz a 12 GHz, é utilizada pelos radares de alta resolução de detecção, identificação e traqueamento de alvos, como os encontrados em sistemas de defesa antiaérea baseados em terra e mísseis guiados.

Tabela 2.1 Espectro eletromagnético e suas aplicações

Designação da Banda	Faixa de Frequência (MHz)	Aplicações
HF	3 – 30	Sistemas de vigilância aérea de altíssimo alcance
VHF	30 – 300	
UHF	300 – 1.000	
L	1.000 – 2.000	Sistemas de vigilância aérea de longo alcance e controle de tráfego aéreo
S	2.000 – 4.000	Sistema de vigilância aérea de médio alcance, controle próximo de tráfego aéreo, radares meteorológicos de longo alcance.
C	4.000 – 8.000	Monitoramento a longas distâncias, radares meteorológicos aero-embarcados.
X	8.000 – 12.000	Monitoramento a curtas distâncias, sistemas de guias de mísseis, radar marinho, sistemas de interceptação de aeronaves.
Ku	12.000 – 18.000	Mapeamento de alta resolução, altimetria de satélites.
K	18.000 – 27.000	Pouco utilizado devido à interferência com o vapor de água.
Ka	27.000 – 40.000	Mapeamento de altíssima resolução, sistemas de vigilância de aeroportos
Milimétrica	40.000 – 300.000	Experimental

O projeto de objetos com baixo RCS, ou o uso de materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE) para cobrir superfícies metálicas, são as soluções possíveis para reduzir a assinatura de alvos. Desta forma, absorvedores de microondas têm sido amplamente usados para minimizar reflexões eletromagnéticas de grandes estruturas, como aeronaves, navios e tanques [29].

Para Migliano [30], “a tecnologia de produção de revestimentos absorvedores de radiação eletromagnéticos do tipo manta, está relacionada com o desenvolvimento de novos materiais e suas propriedades eletromagnéticas”. O autor apresenta uma metodologia para produção de revestimentos planos de única camada com características de absorção sintonizadas na frequência de 9GHz. A técnica de processamento utilizada para fabricação da ferrita de composição $MgO-MnO-Fe_2O_4$ foi a metalurgia do pó, sendo eliminada a etapa de compactação. Os pós da ferrita foram misturados à resina epóxi na proporção de 50% do volume do material, para obtenção de revestimentos de 30cmx30cmx2mm. O método utilizado para medidas de absorção foi o NRL, para medidas de seção reta radar (RCS - Radar Cross Section). Foram utilizadas três amostras de ferritas de diferentes composições, mostradas na tabela 2.2, a fim de verificar as características de seletividade no espectro eletromagnético.

Tabela 2.2 Composição estequiométrica das amostras [30].

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

Ele constatou que as características de absorção seletiva de radiação eletromagnética nas mantas absorvedoras eram devidas aos aditivos de ferrita do tipo $MgO_{\alpha}Mn_{1-\alpha}OFe_2O_4$, sendo sua aplicação indicada para a faixa de

8,5GHz a 9,5GHz, na qual foi observada uma refletividade menor que -10dB, com um mínimo de -15 dB para uma das amostras, conforme figura 2.4.

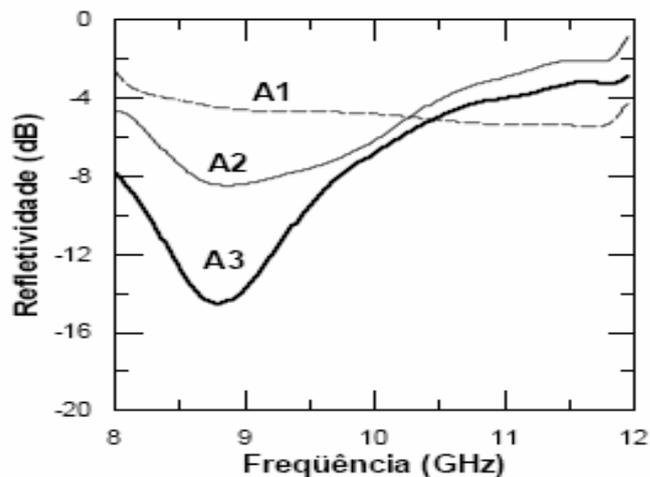


Figura 2.4 Níveis de absorção em função da freqüência das amostras [30].

O autor sugeriu que as características de absorção poderiam ser otimizadas em função da porcentagem em volume do aditivo cerâmico presente na manta. E estabeleceu parâmetros para melhorar o processo de fabricação de revestimentos utilizados como blindagem eletromagnética, com o objetivo de aumentar a eficiência da absorção das mantas desenvolvidas para aplicações especiais.

De acordo com Resende [31], os absorvedores dielétricos dependem da perda ôhmica de energia que pode ser obtida pela carga no preenchimento com carbono, grafite, polímeros condutores, dentro de uma matriz polimérica. Absorvedores magnéticos dependem do efeito de histerese magnética que é obtido quando partículas de ferritas são colocadas dentro de uma matriz polimérica. Segundo ele, para calcular o RCS de um material, deve ser considerada a energia que é transferida de volta do alvo na condição de espaço livre, para a antena radar Tx/Rx, sendo esta antena a mesma usada para lançar a irradiação. O RCS do alvo é uma função de transferência da densidade de potência incidente e da densidade de potência refletida. A relação entre o RCS e a distância entre o objeto e a antena é dada por:

$$P_R = \frac{P_T G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad (2.3)$$

onde, R é a distância (m), σ o RCS (m^2), λ o comprimento de onda (m), G o ganho da antena (dBi), P_T a potência de transmissão (W) e P_R a potência de recepção (W). O efeito da redução do RCS de um objeto na distância de detecção de um radar é mostrado na figura 2.5, em que um objeto com RCS igual a $10.000 m^2$ é detectado por um sistema radar a 100 km de distância. Se sua RCS for reduzida em 50% ($5.000 m^2$), que corresponde a uma atenuação de 3dB, a distância de detecção é reduzida para 84,6km. Para a distância de detecção cair pela metade (50 km) é necessário que a seção reta radar seja reduzida em 94% (-12 dB). Da mesma forma, para o objeto não ser detectado a 20 km, a RCS deve ser reduzida em 99,9 % (-30 dB), e, para não detecção a 10 km uma redução da RCS deve ser igual a 99,99 % (-40 dB).

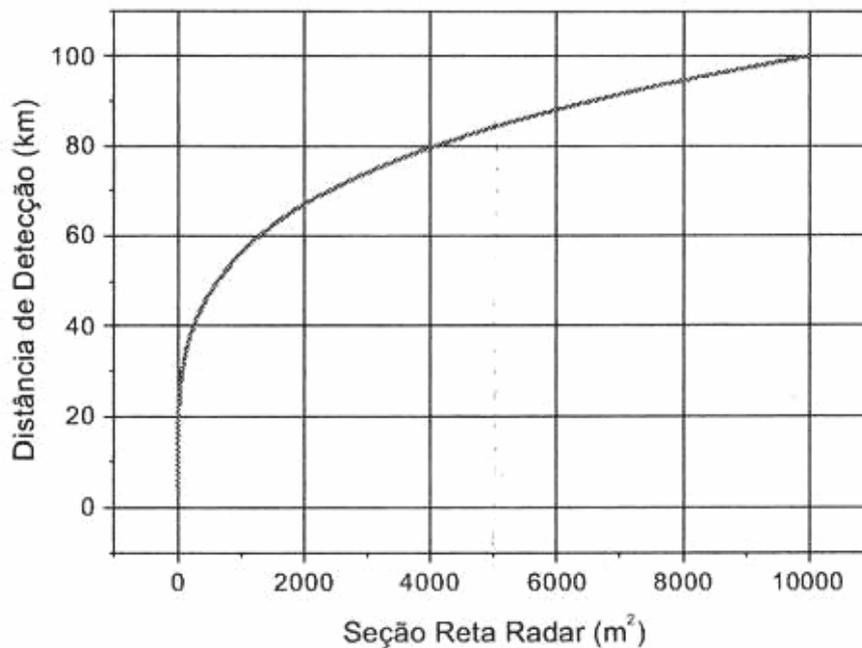


Figura 2.5 Efeito da redução da RCS na distância de detecção de um alvo [28].

Para este experimento, camadas de MARE's dielétricos e magnéticos foram fabricadas nas dimensões de 20cm x 17cm x 4mm. A Figura 2.6 mostra o diagrama RCS de uma placa de alumínio obtida a 8GHz, com rotação de 180° . É observado um pico a 0° , correspondendo a valores de -49dBm, devido à incidência normal da onda eletromagnética na placa de referência.

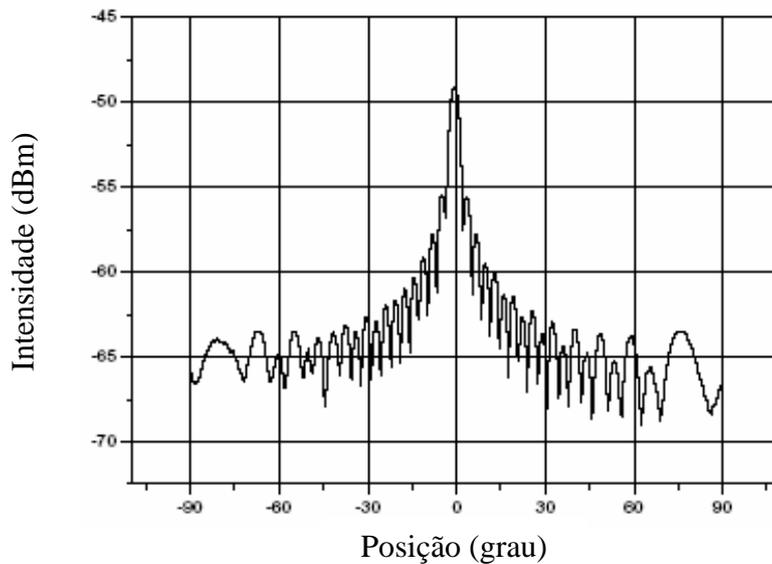


Figura 2.6 Diagramas de RCS (dBm) de uma placa de alumínio (20cmx17cm) obtidos na frequência de 8GHz [31].

A seção reta radar (σ) está relacionada com a densidade de potência refletida e não com a área real de um determinado alvo. Para um perfeito refletor quadrado plano, pode-se calcular o valor teórico de RCS como uma função da frequência da radiação incidente, de acordo com a equação:

$$\sigma = \frac{4\pi a^2 b^2}{\lambda^2} \quad (2.4)$$

onde a é a altura (m), b o comprimento (m) e λ o comprimento da onda (m). Assim sendo, uma placa plana com dimensões de 97mm x 97mm na frequência de 9,0 GHz possui uma seção reta radar igual a 1,0 m². Logo, se um objeto, como, por exemplo, um míssil, possui o valor de RCS igual a 1m² em 9,0 GHz a 100km do radar em um determinado ângulo de aspecto, este reflete a mesma densidade de potência que uma placa de 97mm x 97mm colocada na mesma posição do míssil. A tabela 2.3 mostra a variação do RCS em função da frequência para um refletor com dimensões de 20cm x 17cm.

Tabela 2.3 Valores de RCS calculados para uma chapa plana de alumínio (20cm x 17cm) como função da frequência [31].

Frequência (GHz)	RCS (m ²)
8,0	10,3
9,0	13,0
10,0	16,1
11,0	19,5
12,0	23,2

Foram confeccionados MARE's magnéticos (MnZn, NiZn e MgZn) e dielétricos (polianilina) e os resultados mostraram uma redução do RCS de 55 a 98% para os painéis magnéticos e de 40 a 95% para os painéis dielétricos, quando os mesmos foram colocados em incidência normal. As camadas de MARE magnéticas se mostraram mais efetivas para atenuar a radiação incidente que o MARE coberto com polímero condutor nas frequências de 8 a 12GHz. Entretanto, considerando que o MARE coberto com material dielétrico é aproximadamente cinco vezes (5x) mais leve que o magnético, sua aplicação no campo aeronáutico é muito promissor.

Para Meshram [32], a ferrita é um metal óxido, que contém íons magnéticos arranjados de tal forma que produz magnetização espontânea, enquanto mantém boas propriedades dielétricas. Ele desenvolveu e caracterizou pós de ferritas hexagonais $[\text{BaCo}_{0,5\delta}\text{Ti}_{0,5\delta}\text{Mn}_{0,1}\text{Fe}_{11,87-\delta}\text{O}_{19}]$ e $[\text{Ba}(\text{MnTi})_{\delta}\text{Fe}_{12-2\delta}\text{O}_{19}]$ com $\delta = 1,6$, como absorvedores de microondas. O processo de fabricação das hexaferritas de bário em pó foi por atrito a seco e sinterização, misturando-se o material com resina epóxi para formação de tintas de 1mm de espessura. A tinta foi colocada sobre a superfície de uma folha de alumínio, a fim de estudar as características de absorção de microondas na faixa de frequência de 8GHz a 12 GHz. Foram utilizados revestimentos com uma e duas camadas do absorvedor para diferentes espessuras do material. O método de medição de refletividade foi o ATD (Absorber Testing Device). Constatou que a permissividade e a permeabilidade complexas variavam com a frequência e que a absorção de energia de

microondas dependia da espessura da camada do absorvedor; tendo-se obtido entre as frequências de 8,5 a 11,8 GHz, um mínimo de absorção de 10 dB em uma amostra com uma camada de 2mm de espessura e um máximo de 24dB.

Em 2004, Freitas [33] observou as características de absorção da radiação eletromagnética em revestimentos planos à base de ferrita de Mn-Zn e resina epóxi, em que as medidas de refletividade foram realizadas na faixa de 8GHz a 12GHz, usando a técnica da reflectometria em guia de ondas. O processo de fabricação da ferrita foi baseado na tecnologia do pó, utilizando na composição estequiométrica com 25% de ZnO, 25% de MnO e 50% de Fe₂O₃. As misturas foram preparadas na proporção de 25% de ferrita e 75% de resina epóxi para confecção de corpos de prova nas dimensões de 2cmx3cmx4cm. O método para medição da absorção foi o de reflectometria em guias de ondas com o auxílio do acoplador direcional, que permite a varredura em frequência dentro da faixa recomendada. Constatou que as características de absorção seletiva de radiação da amostra obtiveram um nível de absorção em torno de 10 dB, na faixa de 8 a 12GHz, e que estas características poderiam ser otimizadas em função do percentual de volume do aditivo cerâmico Mn-Zn na composição da amostra.

Nesse mesmo ano, Sugimoto [34] obteve hexaferrita de bário dopada com cobalto e titânio de composição [BaFe_{9,5}(Co_{1-y}Ti_y)_{2,5}O₁₉ com y = 0,4 a 0,8] pelo método de co-precipitação modificado, o qual é a combinação do processo químico de co-precipitação com a síntese de fundição do sal. O autor observou que amostras de 3,1 mm de espessura apresentaram uma boa propriedade de absorção de microondas (R< -20dB) na faixa de 0,65GHz a 1,0GHz. Os valores das perdas por reflexão foram obtidos por equações matemáticas e demonstraram que as ferritas preparadas por este método poderiam vir a ser um bom material absorvedor de microondas na faixa de GHz. Algumas amostras também foram misturadas com 0 a 20% de Bi₂O₃, visando aumentar a permeabilidade, sendo prensadas e sinterizadas de 1223K a 1523K por 5 horas. A figura 2.7, mostra a permeabilidade relativa μ_r , como função da frequência e composição das amostras, sinterizadas a 1423K com adição de 2% em peso de Bi₂O₃.

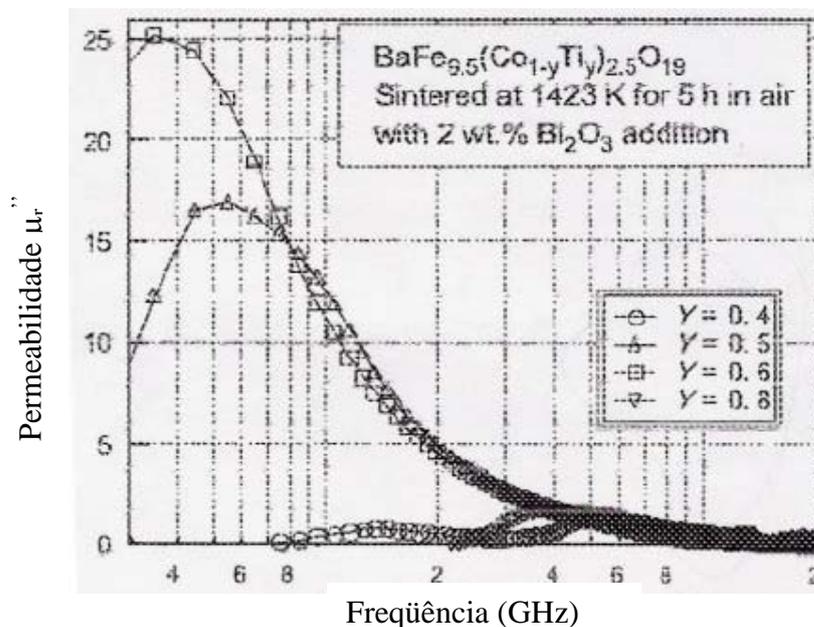


Figura 2.7 Gráfico da permeabilidade relativa μ_r'' dependente da frequência das amostras de $\text{BaFe}_{9,5}(\text{Co}_{1-y}\text{Ti}_y)_{2,5}\text{O}_{19}$ com $y = 0,4$ a $0,8$, sinterizadas por 5h com adição 2% de Bi_2O_3 [34].

Observa-se que a variação da permeabilidade relativa (μ_r'') da composição $\text{BaFe}_{9,5}(\text{Co}_{0,5}\text{Ti}_{0,5})_{2,5}\text{O}_{19}$, quando $y = 0,5$, obteve valor máximo igual a 17. Sugimoto ressaltou que, embora vários autores tenham reportado que as ferritas tipo M possuem função de absorção de microondas na faixa de GHz pela substituição de íon Fe^{3+} por outros íons, para a redução da espessura de um absorvedor, um aumento na perda magnética (μ_r'') é fortemente exigido.

No ano de 2005, Bregar [35] observou que os avanços na tecnologia de uso de comunicações sem fios e sistemas de radar acarretaram um aumento significativo nos níveis de radiação eletromagnética, fazendo-se necessário proteger dispositivos eletrônicos e humanos dos efeitos dessa irradiação. Logo, os absorvedores de radiação que convertem a radiação eletromagnética em calor aumentaram a sua importância para aplicações externas em campos especiais, como: salas silenciosas, sistemas radar e aplicações militares. Para Bregar, um absorvedor típico consiste em uma camada absorvedora colocada sobre uma folha de metal delgada e o princípio de operação consiste na redução significativa da onda refletida pela sua

absorção na camada ativa. As características de um absorvedor podem ser determinadas diretamente com medidas padronizadas de reflexão no espaço livre e/ou indiretamente de medidas das propriedades magnéticas que constituem o material. Há um método analítico bastante utilizado que calcula as características de absorção de conhecidas características e geometrias dos materiais. Para geometrias simples, como os absorvedores de camada única, observou-se que as diferenças entre os cálculos analíticos e experimentais eram muito pequenas para um absorvedor plano. Assim sendo, o autor sugeriu que este método era suficiente para caracterizar o material e calcular a reflexão, obtendo-se assim as características de absorção através das equações (3.1 e 3.2). Ele processou pós de ferritas (S/M e Z/M) usando o método convencional, onde o carbonato de bário foi misturado com outros óxidos (Fe, Mn, Ni, Co, Bi, etc) a temperaturas entre 1250°C e 1300°C. A reflexão do absorvedor de camada única foi calculada usando as medidas de permeabilidade e permissividade, sendo constatado que as curvas de reflexão são função da complexa interação entre a permeabilidade, permissividade e espessura do absorvedor. Foram confeccionadas amostras com espessuras de 2, 4 e 6mm e as curvas de atenuação demonstraram que quanto maior a espessura, maior era a absorção do material. Foram também confeccionadas algumas amostras com mudanças na composição e condições de sinterização, conforme figura 2.8, onde se constatou que poderiam ser obtidas diferentes propriedades eletromagnéticas e, conseqüentemente, boas propriedades para um absorvedor, ou seja, com variações na composição, na microestrutura e as condições de sinterização, somos capazes de variar consideravelmente as propriedades eletromagnéticas para obter boas propriedades para um absorvedor.

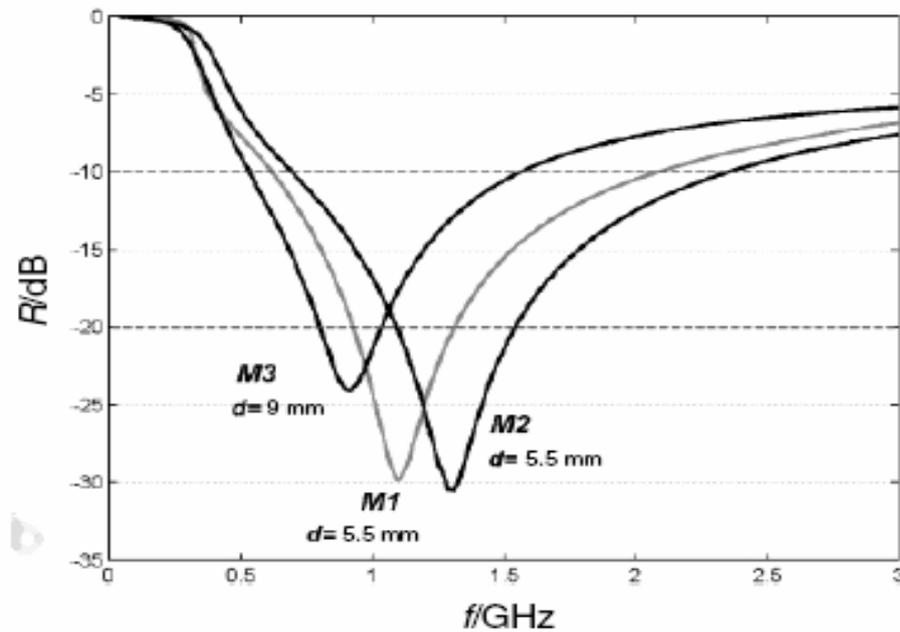


Figura 2.8 Amostras com propriedades de absorção: M1, $\Delta f(-20\text{dB})=370\text{MHz}$, $R_{\text{MIN}}=-30\text{dB}$; M2, $\Delta f(-20\text{dB})=420\text{MHz}$, $R_{\text{MIN}}=-30\text{dB}$ e M3, $\Delta f(-20\text{dB})=240\text{MHz}$, $R_{\text{MIN}}=-24\text{dB}$ [35].

Em meados de 2006, Jianxun Qiu [36] trabalhou com filmes compósitos de hexaferrita de bário e dióxido de titânio pelo método sol-gel, investigando a morfologia e propriedades magnéticas e de absorção de microondas destes filmes que tiveram diferentes razões de peso na constituição dos mesmos. De acordo com o autor, o método sol-gel é um tipo de processo de preparação potencial de filmes, que possui as vantagens de homogeneidade química, fácil ajuste de componentes, baixa temperatura de calcinação e baixo custo. Apesar disto, os filmes de ferritas sintetizados pelo método sol-gel não têm sido satisfatórios, devido ao surgimento de microtrincas durante a calcinação. Logo propôs fazer filmes compósitos de ferrita de bário sem microtrincas com dióxido de titânio como matriz. O método proporcionou obter grãos com diâmetros menores que $100\mu\text{m}$ e observou que com o aumento da ferrita de bário na composição, o diâmetro dos grãos diminuía. A morfologia e microestrutura foram todas diferenciadas em função da taxa das misturas de hexaferrita e dióxido de titânio (1/5, 2/5, 3/5). Observou que a área interna da curva de histerese é um importante parâmetro no campo da absorção eletromagnética,

ou seja, um loop de histerese com maior área produz uma maior perda de energia. Para caracterização de absorção, a perda de microondas foi calculada pela equação:

$$A_{dB} = 10 \text{Log} \frac{P_T}{P_I - P_R}, \quad (2.5)$$

onde P_T é a potência transmitida, P_I é a potência incidente e P_R é a potência recebida [37].

Os resultados constataram que os filmes compósitos possuíam uma excelente propriedade magnética e de absorção de microondas com uma perda máxima, chegando a 40dB, quando a taxa de peso da $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ e TiO_2 foi de 3:5, sendo que a capacidade de absorção de microondas de um material magnético está relacionado à magnetização de saturação e à estrutura dos domínios magnéticos. E que o aumento da concentração de ferrita na composição das amostras tornava a área do loop de histerese maior, ocasionando uma maior perda.

2.3 NOÇÕES DE MAGNETISMO E TRANSMISSÃO DE SINAIS

Magnetismo é o fenômeno segundo o qual os materiais impõem uma força ou influência atrativa ou repulsivamente sobre outros materiais. O ferro, alguns aços e o mineral magnetita são exemplos bem conhecidos de materiais que exibem propriedades magnéticas [38]. A primeira aplicação tecnológica magnética é a bússola. Em 1820, Oersted descobriu que uma corrente elétrica passando por um fio também produzia efeitos magnéticos, mudando a orientação da agulha de uma bússola. Esta correlação ocasionou o surgimento de um novo conceito: o eletromagnetismo. Eletromagnetismo é o estudo dos campos magnéticos e suas interações com as correntes elétricas. Os fenômenos nos quais intervêm tanto a corrente elétrica como o campo magnético, são denominados de fenômenos eletromagnéticos [39].

São três os fenômenos eletromagnéticos básicos:

1. se uma corrente elétrica fluir por um condutor será criado, ao redor do mesmo, um campo magnético (o condutor produzirá um campo magnético, como se fosse um ímã);
2. se um condutor percorrido por uma corrente elétrica for colocado dentro de um campo magnético, ficará sujeito a uma força; e
3. se um condutor fechado for colocado em um campo magnético, de modo que a superfície determinada pelo condutor seja atravessada pelo fluxo magnético, a variação do fluxo induzirá no condutor uma corrente elétrica.

2.3.1 Campos e Ondas

O comportamento magnético é determinado principalmente pela estrutura eletrônica do material, que irá influenciar na formação dos dipolos magnéticos. As interações entre estes dipolos determinam o tipo de comportamento magnético do material, o qual pode ser modificado pela composição, microestrutura e processamento destes materiais [40]. Os campos e as forças magnéticas têm origem no movimento de carga elétrica fundamental, isto é, do elétron. Nos materiais, o magnetismo é causado por elétrons em movimento, mas nesse caso, os campos e forças magnéticas são devidos ao spin intrínseco do elétron e ao movimento orbital em torno dos respectivos núcleos [41]. Os elétrons giram em torno do núcleo dos átomos, mas também em torno de si mesmos, isto, é semelhante ao que ocorre com os planetas e o sol. Há diversas camadas de elétrons e, em cada uma, os elétrons se distribuem em *orbitais*, regiões onde executam a rotação, distribuídos aos pares. Ao rodarem em torno de si, os elétrons da camada mais externa produzem um campo magnético mínimo, mas dentro do orbital, o outro elétron do par gira, também, em sentido oposto, cancelando este campo, na maioria dos materiais. Porém nos materiais imantados (ferromagnéticos) há regiões, chamadas domínios, onde alguns dos pares de elétrons giram no mesmo

sentido e um campo magnético resultante da soma de todos os pares e domínios é exercido em volta do material: são os *ímãs* [42].

Os materiais se comportam de várias maneiras, sob influência dos campos magnéticos:

- os diamagnéticos, como o cobre, criam um campo contrário, opondo-se a variação do campo magnético externo ($\mu_r < 1$);
- os paramagnéticos, os momentos magnéticos não se cancelam mas, devido à distribuição aleatória, a magnetização total é nula ($\mu_r > 1$);
- os ferromagnéticos apresentam alta magnetização espontânea abaixo da temperatura de Curie ($\mu_r \gg 1$).

Quando um material é submetido a um campo magnético intenso, como o produzido por um solenóide, o campo magnético do solenóide tende a alinhar os momentos magnéticos (permanentes ou induzidos) que existem no interior do material. O grau de alinhamento dos dipolos magnéticos é definido por um parâmetro denominado magnetização [43].

A onda é uma perturbação de matéria ou energia que se propaga no espaço e que mantém as suas características. Transporta energia (e informação), mas não matéria. Existem dois tipos de ondas: ondas mecânicas (perturbação num meio material, do qual dependem para se propagarem, por exemplo o som), e ondas eletromagnéticas (propagação de um campo elétrico e magnético que não necessita de um meio material para se propagar). As características das ondas eletromagnéticas [44], mostradas na figura 2.9, são as seguintes:

- são formadas por campos elétricos e campos magnéticos variáveis;
- o campo elétrico é perpendicular ao campo magnético;
- são ondas transversais (campos perpendiculares à direção de propagação);
- propagam-se no vácuo com a velocidade "c";
- podem propagar-se num meio material com velocidade menor que a obtida no vácuo.

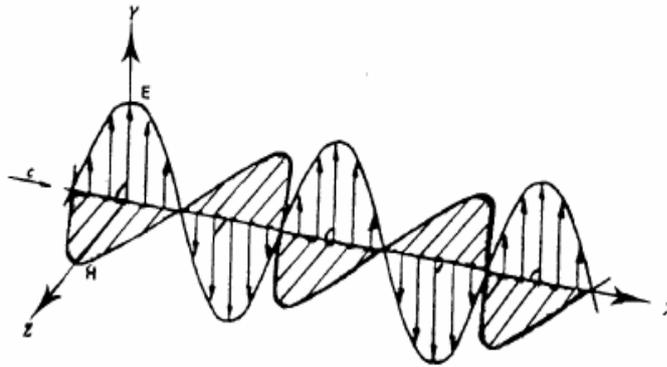


Figura 2.9 Onda eletromagnética [44]

Uma onda pode ser caracterizada através da seguinte equação:

$$V(t) = A \text{ sen } (\omega_0 t + \theta) \quad (2.6)$$

onde: $V(t)$ = Amplitude instantânea da portadora no instante t

A = Amplitude máxima da portadora

ω_0 = Freqüência angular da portadora ($2\pi f$)

θ = Fase da portadora

A partir da equação da onda acima, vê-se que se podem variar três componentes da onda para imprimir uma informação na portadora. Assim, variando amplitude, freqüência ou fase, pode-se "modular" a onda de acordo com a variação da onda moduladora (que contém a informação). Pode-se, ainda, definir comprimento de onda (λ), que significa a distância mínima em que o ciclo se repete (em metros) e o período da onda (T), ou o tempo que leva para a onda efetuar um ciclo (em segundos). Sabendo-se que a freqüência é o inverso do período, chega-se à seguinte equação:

$$\lambda = \frac{v_{luz}}{f} \quad (2.7)$$

Quando duas ondas são superpostas, suas amplitudes são somadas algebricamente e a onda resultante dessa soma depende da fase. Assim, duas ondas de mesma freqüência e amplitude, começando seus ciclos em zero grau, quer dizer, em fase, vão resultar numa onda com mesma freqüência e

amplitude igual a duas vezes. Mas se essas ondas estiverem defasadas, essa relação de amplitude é modificada. Para duas ondas de mesma frequência e amplitude, mas defasadas em 180°, as amplitudes ficarão exatamente opostas, cancelando-se totalmente.

2.3.2 Unidades de Transmissão

A percepção do volume sonoro está relacionada à variação de pressão gerada por uma onda sonora e, portanto, à sua intensidade. Nosso sistema auditivo tem dois limites de audibilidade:

- Limiar de audibilidade (mínima intensidade audível) = 10^{-12} Watt/m²
- Limite de dor (máximo nível de intensidade audível sem danos fisiológicos ou dor) = 1 Watt/m². Isto representa uma variação muito grande. Em telecomunicações usam-se escalas logarítmicas para medir relações de potências elétricas, em virtude das grandes variações existentes entre sinais. Um circuito elétrico pode apresentar uma atenuação ou um ganho de sinal. Uma atenuação significa que a potência do sinal de entrada do circuito é maior que a potência na saída e um ganho significa o contrário [45], como pode ser visto na figura 2.10.

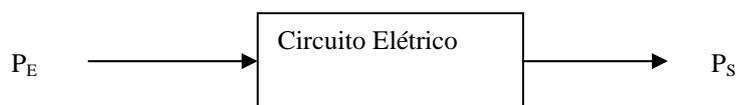


Figura 2.10 Diagrama de bloco de um circuito elétrico

A relação logarítmica entre as potências de um sinal (entrada e saída) é definido por Bell.

$$A_{BELL} = \text{Log} \frac{P_S}{P_E} \quad (2.8)$$

Na prática, usa-se a subunidade denominada decibel.

$$A(dB) = 10 \text{Log} \frac{P_S}{P_E} \quad (2.9)$$

se $A < 0$, significa uma atenuação, se $A > 0$ significa um ganho.

O dBm expressa amplificação (ganho ou atenuação) de um sinal em relação a uma potência de 1mW (referência), ou seja, indica quantos decibéis o sinal está acima ou abaixo de 1mW.

$$A(dBm) = 10 \text{Log} \frac{P(mW)}{1mW} \quad (2.10)$$

O dBu é uma medida absoluta que indica quantos decibéis uma determinada tensão está acima ou abaixo de 0.775 Volt.

$$A(dBu) = 20 \text{Log} \frac{\text{tensão}(V)}{0,775V} \quad (2.11)$$

O dBu está relacionado com a potência em dBm, pela seguinte expressão:

$$P(dBm) = 20 \text{Log} \frac{\text{tensão}(V)}{0,775V} + 10 \text{Log} \frac{600\Omega}{Z^*}, \quad (2.12)$$

onde Z^* é a impedância do ponto de teste. O fator de correção K(dB) dado por:

$$K(dB) = 10 \text{Log} \frac{600\Omega}{Z^*} \quad (2.13)$$

é usado quando a impedância do ponto de teste ou medida, for diferente de 600 Ω , conforme tabela 2.4, abaixo:

Tabela 2.4 Fator de correção das principais impedâncias [46]

Z^* (Ω)	600	300	150	75	60	50
K (dB)	0	3	6	9	10	10,79

2.3.3 Atenuação numa Linha de Transmissão

As ondas de rádio que percorrem uma linha de transmissão perdem gradualmente sua intensidade devido à atenuação da linha, ou seja, há uma diminuição gradual das amplitudes de suas correntes e tensões instantâneas. Uma das razões para que isto ocorra é a queda de tensão (IR) ao longo da linha, causada por sua resistência em série distribuída. Outro é o fato de que a fuga G e a capacitância “shunt” C entre os condutores da linha impedem que parte da corrente percorra toda a linha. A potência, que é o produto da tensão pela corrente (EI), diminuirá gradualmente com o aumento da distância entre emissor e receptor. Uma seção de linha de transmissão contém valores finitos das principais características elétricas da linha, ou seja, R, L, C e G. As amplitudes das ondas de tensão e de corrente só diminuirão na mesma proporção em toda a linha se as constantes distribuídas tiverem valores uniformes em cada seção da linha. Quando as seções de linha apresentam constantes distribuídas diferentes, a impedância, Z_0 , apresenta variações e isto resultará em uma taxa de redução diferente nos valores de tensão e corrente na entrada e na saída de cada seção de linha. Logo, a saída resultante não diminuirá uniformemente ao longo da linha e serão reduzidas ou atenuadas em certas frequências mais do que em outras [46].

2.3.4 Modulação

Modulação é o processo que consiste em fazer um dos parâmetros de uma onda portadora senoidal $p(t) = E_0 \cos(2\pi f_0 t + \Phi)$ de alta frequência variar acompanhando o sinal $x(t)$ de informação que se quer transmitir, denominado sinal modulador. A característica básica do processo de modulação é o deslocamento do espectro do sinal modulador para a frequência da portadora. Outra razão importante para o processo de modulação é a facilidade de irradiação. Sabemos que para que ocorra irradiação eletromagnética eficiente é necessário que o elemento irradiante (antena) tenha dimensões físicas da

ordem de grandeza (pelo menos um décimo) do comprimento de onda do sinal que se deseja irradiar [47]. Um processo de modulação consiste em modificar o formato da informação elétrica com o objetivo de transmiti-la com:

- a menor potência possível;
- a menor distorção possível;
- facilidade de recuperação da informação original;
- o menor custo possível.

A modulação em amplitude é um processo que resulta no deslocamento do espectro do sinal que contém a informação, com a alteração de sua amplitude, para uma faixa de frequência mais elevada, de forma a viabilizar a transmissão do sinal resultante via ondas eletromagnéticas.

2.3.4.1 Modulação AM-DSB

O diagrama de blocos da figura 2.11 mostra o circuito elétrico que produz a modulação em amplitude com faixa lateral dupla (AM-DSB - amplitude modulation with double side-band) [48], que é composto de:

- um duplexador para adicionar um sinal constante A ao sinal modulador $g(t)$ com largura de faixa B ;
- um oscilador a cristal para gerar a onda portadora cossenoidal de alta frequência F ;
- um misturador que realiza o produto $m(t)$ da onda cossenoidal pelo sinal modulador adicionado do sinal constante;
- um filtro passa-faixa que elimina sinais indesejáveis gerados pelo misturador;
- um amplificador de potência que permite a transmissão do sinal modulado $z(t)$ por longas distâncias, seja via cabo ou via rádio.

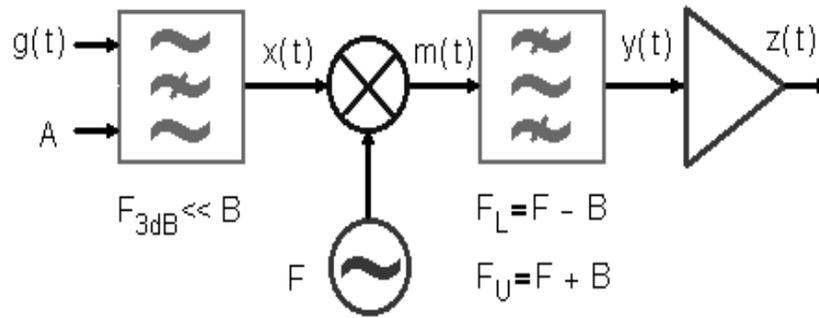


Figura 2.11 Diagrama de blocos de um modulador AM-DSB [48]

O processo de modulação AM-DSB pode ser facilmente analisado tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência, cujos gráficos são mostrados na figura 2.12.

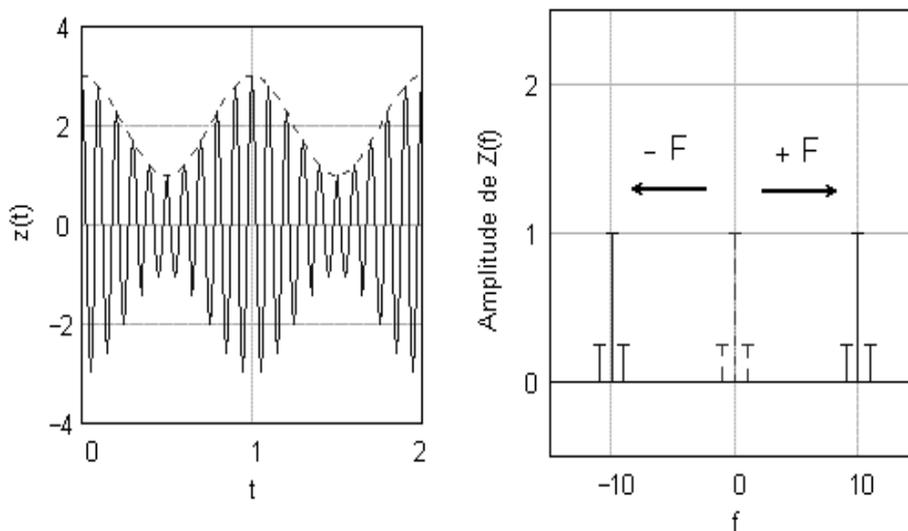


Figura 2.12 Forma de onda e espectro de amplitude do sinal modulado [48]

2.3.4.2 Demodulação AM-DSB

O diagrama em blocos do circuito elétrico que restaura o sinal modulador a partir do sinal AM-DSB, mostrado na figura 2.13, é formado por:

- um amplificador de baixo ruído que amplifica o sinal modulado recebido $z'(t)$ sem adicionar ruído em excesso ao estágio seguinte,

- um detector que retifica o sinal amplificado de forma a produzir um sinal $m'(t)$ que possui componentes de baixa freqüência,
- um filtro passa-baixas que elimina os sinais indesejáveis de alta freqüência gerados pelo detector, e
- um duplexador que separa o sinal constante A' do sinal demodulado $g'(t)$.

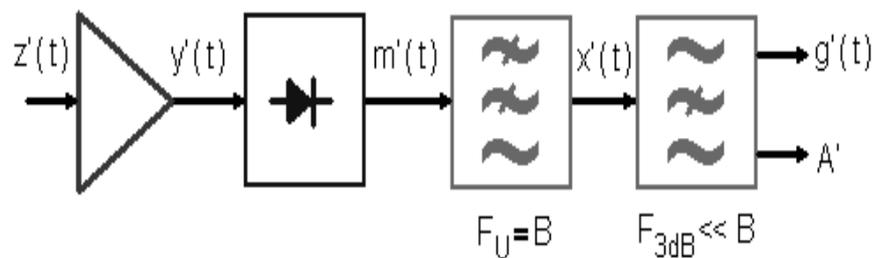


Figura 2.13 Diagrama de blocos de um demodulador [48].

O sinal constante A' pode ser utilizado como realimentação com o objetivo de reduzir o ganho do amplificador de baixo ruído, caso o sinal recebido tenha potência suficiente provocar a saturação. O processo de demodulação AM-DSB também pode ser analisado tanto no domínio do tempo como no domínio da freqüência, conforme pode ser visualizado na figura 2.14.

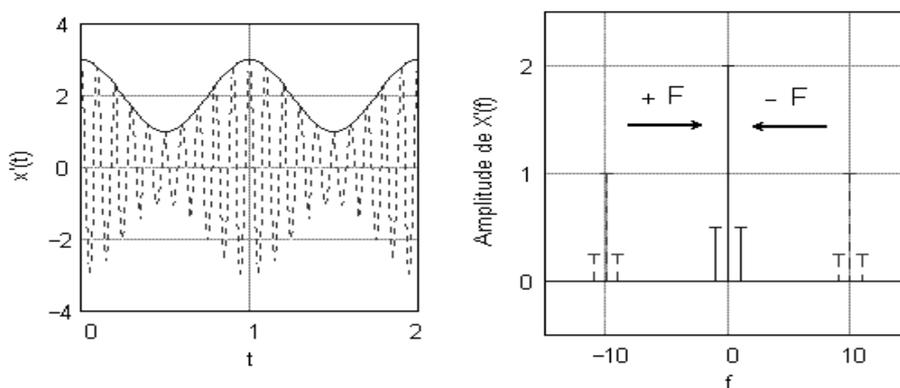


Figura 2.14 Forma de onda e espectro de amplitude do sinal demodulado [48].

2.3.4.3 Detector

Os detectores têm por objetivo retificar um sinal composto por altas frequências, a fim de produzir um sinal com componentes de baixa frequência. Os detectores, ou diodos de microondas, são capazes de ter sensibilidade de $1\eta\text{W}$, mas também são sujeitos a queimar-se com tensões tão baixas quanto 100mW . A figura 2.15, mostra o circuito elétrico e a simbologia dos detectores.

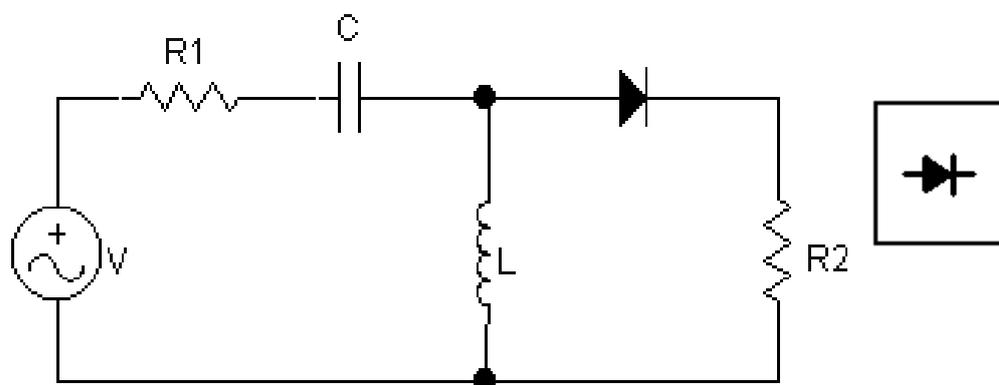


Figura 2.15 Circuito elétrico e símbolo de um detector [48]

No circuito acima, os elementos têm as seguintes funções:

- os componentes L e C promovem o casamento de impedâncias do detector, sendo que para uma análise simplificada, C pode ser considerado como um curto-circuito e L como um circuito aberto (altas frequências);
- o diodo retificador permite a passagem da corrente elétrica somente no sentido de R1 para R2, comportando-se como um curto-circuito neste caso e como um circuito aberto no caso contrário.

2.3.5 Guia de Ondas

Guias de ondas são tubos metálicos ocos ou preenchidos com material dielétrico utilizados para transmissão de energia em altas frequências (normalmente acima de 1GHz), é um tipo de estrutura constituída de um único condutor envolvendo um dielétrico. Num guia de ondas retangular, a propagação de uma onda se processa através de reflexões nas paredes laterais do guia para uma onda plana polarizada verticalmente, tendo seu trajeto paralelo às superfícies inferior e superior do guia, sendo que o comprimento desta onda plana é o mesmo do espaço livre, $\lambda = v/f$, onde v é a velocidade da luz no vácuo (3×10^8 m/s) [49].

O guia de ondas retangular tem suas características determinadas por suas dimensões: altura e largura medidas entre as dimensões internas do guia. Sendo $a > b$, o modo dominante do guia retangular é o TE_{10} [50]. Este modo é de maior interesse na prática, já que possui a menor atenuação entre todos modos no guia retangular e por ter o campo elétrico linearmente polarizado, o que pode ser necessário em algumas aplicações. O tamanho do guia de onda é determinado pela faixa de frequência utilizada para caracterizar o material. Quanto menor a frequência, maior será as dimensões do guia de ondas, uma vez que o comprimento de onda é maior. A fim de fornecer uma idéia das dimensões dos guias de ondas retangulares utilizados na prática, a tabela [3.4], fornece os valores de largura (a) e altura (b) de guias, para várias faixas de frequências de microondas. Analisando a tabela 3.4, observa-se que a altura vem a ser, em geral, da ordem de metade do valor da largura. Em qualquer caso, deve-se ter o comprimento de onda λ associado à frequência inferior da faixa, obedecendo à relação $\lambda < 2a$, para permitir a propagação do sinal.

Tabela 2.5 Relação faixa de frequência x dimensões dos guias de ondas [50]

Faixa de Frequência (GHz)	Dimensões Internas (axb)
18,00 – 26,50	10,668 x 4,318
12,40 – 18,00	15,779 x 7,899
10,00 – 15,00	19,05 x 9,525
8,20 - 12,40	22,86 x 10,16
7,05 - 10,00	28,449 x 12,624
5,85 - 8,20	34,649 x 15,799
4,90 - 7,05	40,386 x 21,193
3,95 - 5,85	47,549 x 22,149
3,30 - 4,90	58,166 x 29,083
2,60 – 3,95	72,136 x 34,036

3. TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO DE MARE's

As características de absorção de um MARE estão baseadas no fato de que as substâncias absorvem energia dos campos eletromagnéticos que o atravessam. A quantidade de energia incidente que é absorvida pelo objeto é medida pela densidade de fluxo de energia refletida pelo objeto na direção do receptor radar. RADAR (Radio Detection and Ranging) é um sistema de sensoriamento remoto, que usa as ondas de radio para determinar a posição de objetos no espaço em relação a um ponto conhecido. O radar é baseado na transmissão e recepção de pulsos com um feixe estreito de frequências. Os sinais de retorno (eco radar) são gravados, levando-se em consideração sua intensidade, intervalos de tempo de amostragem e fase das ondas [51]. A potência recebida pela antena, através dos pulsos transmitidos pelo radar, está diretamente ligada às características físico-químicas e geometrias dos alvos.

Os métodos de caracterização de MARE's envolvem fundamentalmente a avaliação da distribuição de energia relacionadas com a interação da OEM com o material. De acordo com o princípio de conservação da energia, a OEM com energia (E_I) incide no material e a sua energia pode ser totalmente ou parcialmente refletida (E_R), atenuada (E_A) ou transmitida (E_T), uma vez que os métodos de caracterização eletromagnética fornecem medidas relativas, isto é, a referência (refletor) e o material absorvedor (MARE) avaliados nas mesmas condições, então:

$$E_I = E_R + E_A + E_T \quad (3.1)$$

Outra condição de caracterização eletromagnética envolve o coeficiente de reflexão $\left(\frac{E_R}{E_I}\right)$ com uma placa metálica sob o material e tendo como referência o sinal refletido por uma placa sem o material.

3.1 Técnica RCS

O RCS (Radar Cross Section), ou Seção Retal Radar, é uma metodologia de caracterização de MARE's, que utiliza um painel metálico de dupla face, onde um lado é liso (referência) e o outro é recoberto ou pintado com o MARE. O painel é fixado em um suporte giratório, que é posicionado frontalmente a uma antena transmissora/receptora, conforme a figura 3.1. A vantagem dessa metodologia é que esta permite a avaliação do eco de referência e da face revestida com o MARE, pela rotação do painel de 0 a 360°, mostrando as curvas de refletividade características dos dois lados do painel, uma após a outra. O RCS é uma medida da razão da potência refletida em uma determinada direção pela potência incidente sobre o alvo, que permite caracterizar um alvo quanto à sua refletividade, através do sinal refletido e medido no receptor do radar. A desvantagem dessa técnica é que o suporte não é completamente invisível para a onda eletromagnética, podendo introduzir reflexões indesejáveis. O revestimento do suporte com material tipo espuma com altas perdas é aconselhável para minimizar essas reflexões [52].

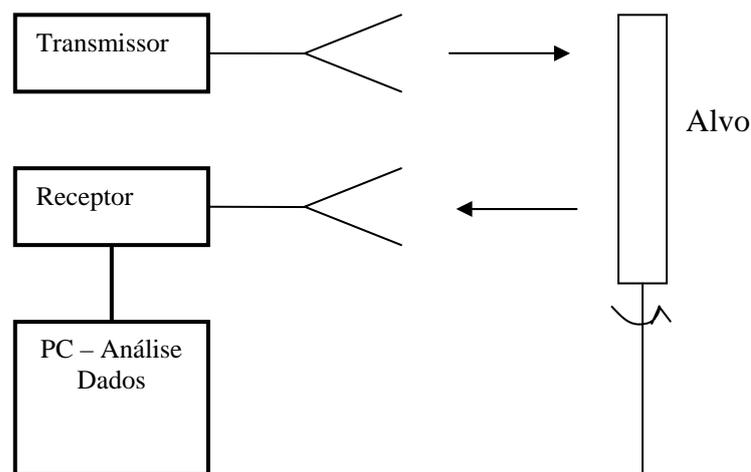


Figura 3.1 Esquema do método de caracterização RCS

A técnica de RCS simula um radar iluminando um alvo, por exemplo, uma aeronave, tratando-se de uma técnica muito útil na área de medidas de refletividade, pelo fato de permitir correlacionar as medidas de refletividade com as características físico-químicas dos materiais, a geometria do alvo e as características das ondas transmitidas e recebidas pelo radar. Todos os sistemas radares podem somente medir mudanças na forma das ondas eletromagnéticas transmitidas, quando as ondas interagem com o meio físico, que espalha a energia de volta ao sistema receptor. Essas mudanças são limitadas a quatro variáveis: amplitude, polarização, fase e frequência. A seção reta radar (σ) de alvos simples, como placas planas, diedros, triedros, esferas e cilindros, pode ser medida, expressa em metros quadrados (m^2).

3.2 Técnica NRL

A técnica NRL (Naval Research Laboratory) consiste, basicamente, em uma estrutura de madeira que permite fixar um par de antenas transmissora e receptora, tipo corneta, em uma variedade de ângulos. Cada corneta, dependendo da frequência, é colocada em um suporte móvel, em qualquer lugar desejado ao longo do arco. A amostra é posicionada sobre um pequeno pedestal no centro da curvatura do arco, conforme mostrado na Figura 3.2. A estrutura do arco é projetada de modo a manter a antena apontada para o centro da amostra em teste. Os tamanhos das placas de referência e da amostra devem ser idênticos. O resultado do índice de refletividade (atenuação do sinal) será a diferença entre a medida da placa de referência e a da amostra. A limitação de uso da técnica do arco NRL é a dificuldade para se medir a fase relativa do sinal refletido. Conseqüentemente, essa técnica é empregada apenas para caracterizar diretamente a amplitude da reflexão.

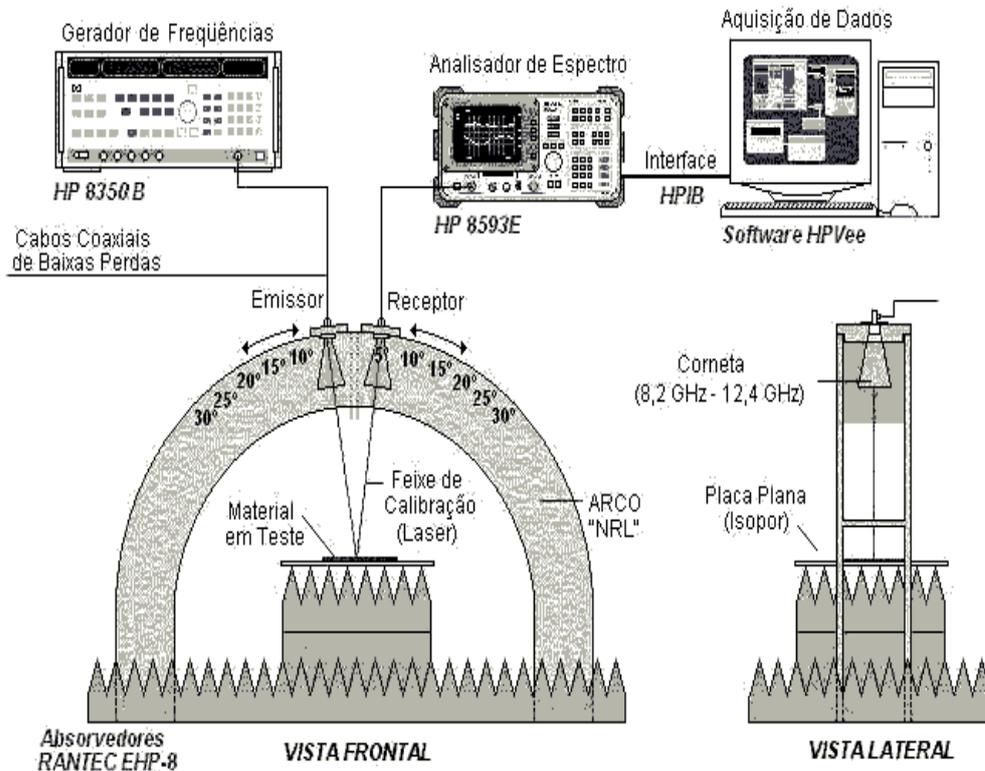


Figura 3.2 Esquema do arco NRL com os acessórios, mostrando par de cornetas ajustável e a amostra em teste no centro do arco [16, 52].

Apesar das técnicas abordadas permitirem a avaliação da atenuação média da radiação incidente no alvo, elas são limitadas quando alvos de geometrias complexas são caracterizados. Porém, sabendo-se que um alvo complexo é formado pela combinação de alvos de geometria mais simples, em disposições diversas, trabalhos envolvendo a caracterização de alvos com geometrias simples e as suas combinações podem ser realizados com o objetivo de elucidar o diagrama de RCS do alvo de geometria complexa. A radiação que atinge a superfície da estrutura de uma aeronave não é apenas refletida, mas também gera uma onda secundária que se propaga paralelamente à superfície. Essa onda se propaga através da superfície da estrutura até encontrar uma descontinuidade, como uma falha, uma junta ou lâmina pontiaguda e nesse ponto será refletida para fora da estrutura.

3.3 Técnica ATD

A técnica ATD (Absorber Testing Device) é basicamente um sistema composto por uma antena corneta piramidal no qual uma seção estendida do guia de ondas é conectada à abertura da corneta. A energia refletida por uma placa de alumínio (alvo) é anotada no medidor de energia. E a energia refletida por uma placa com absorvedor também. A diferença entre as duas leituras dá a energia absorvida pelo MARE.

3.4 Reflectometria em Guia de Ondas

A reflectometria baseia-se num sistema de radar impulsivo funcionando em cadeia fechada. Uma fonte gera um impulso que percorre um determinado meio de transmissão (meio 1). Este impulso, ao atingir o ponto de transição, do meio onde estava a se propagar para um outro meio (meio 2), é refletido, retornando à fonte. A observação feita no ponto de geração do impulso permite mostrar os dois impulsos: o impulso incidente gerado num determinado instante e o impulso refletido defasado de um intervalo de tempo Δt , igual à soma do tempo que o impulso incidente demorou a percorrer a distância, mais o tempo que o impulso refletido demorou a percorrer a mesma distância. Se as medidas e as observações são feitas com base num defasamento temporal resulta na técnica denominada Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR). Se as medidas e observações são feitas no domínio da frequência, a técnica é denominada Reflectometria no Domínio da Frequência (FDR). A figura 3.3 mostra o esquema da instrumentação necessário para efetuar os testes de refletividade em guia de ondas.

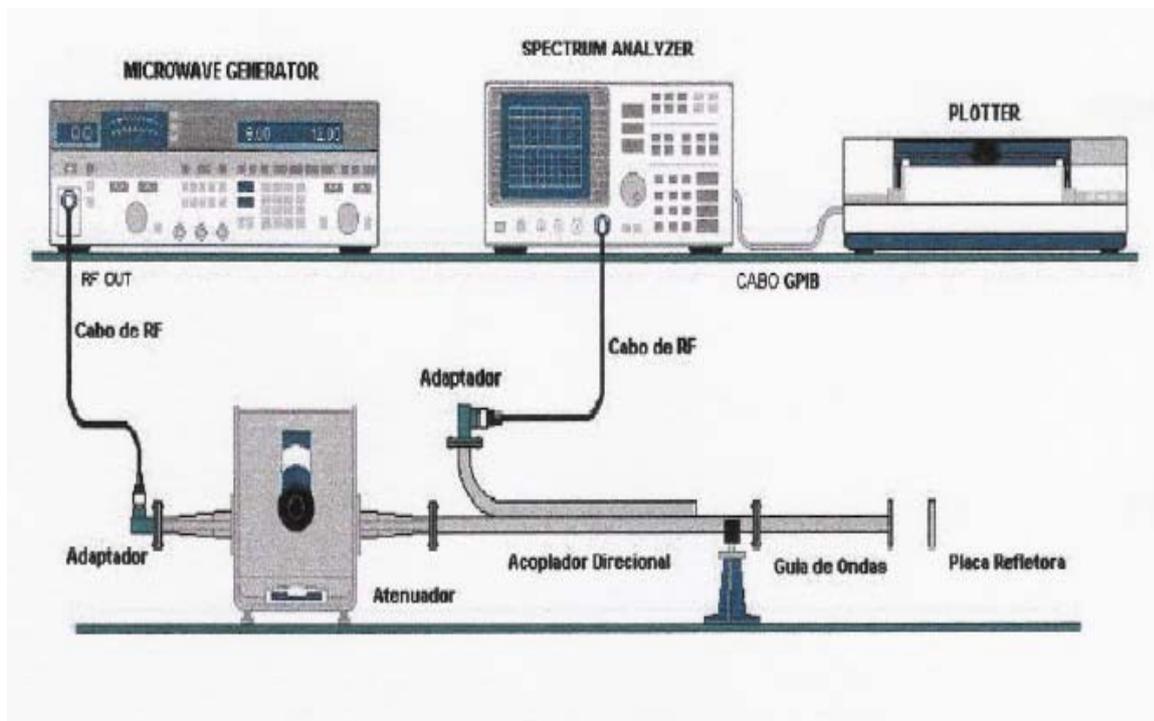


FIGURA 3.3 Esquema da instrumentação utilizado em ensaios de medidas de refletividade por guia de ondas [33].

O método de reflectometria em guia de ondas é um método de medição de refletividade ou absorção de microondas por parte do material, em que um acoplador direcional, que tem propriedade de separar os sinais incidentes dos sinais refletidos [53], faz com que as ondas refletidas na cavidade do guia de ondas sejam direcionadas ao instrumento de medidas, e permite ao gerador fazer a varredura em frequência dentro da faixa especificada pelo fabricante. Um guia de ondas é um dispositivo que permite a propagação de um sinal ao longo de uma única direção, fazendo com que este sinal seja consideravelmente menos atenuado do que se se propagasse no espaço livre. A amostra deve estar com as dimensões exatas do guia de ondas (axb) com um encaixe perfeito, sem presença de vãos entre o material e o guia de ondas, caso contrário, ocorrem erros nas medidas.

4 METODOLOGIA

A metodologia adotada para a obtenção da hexaferrita de bário e investigação das suas propriedades em função da microestrutura é mostrada no fluxograma abaixo:

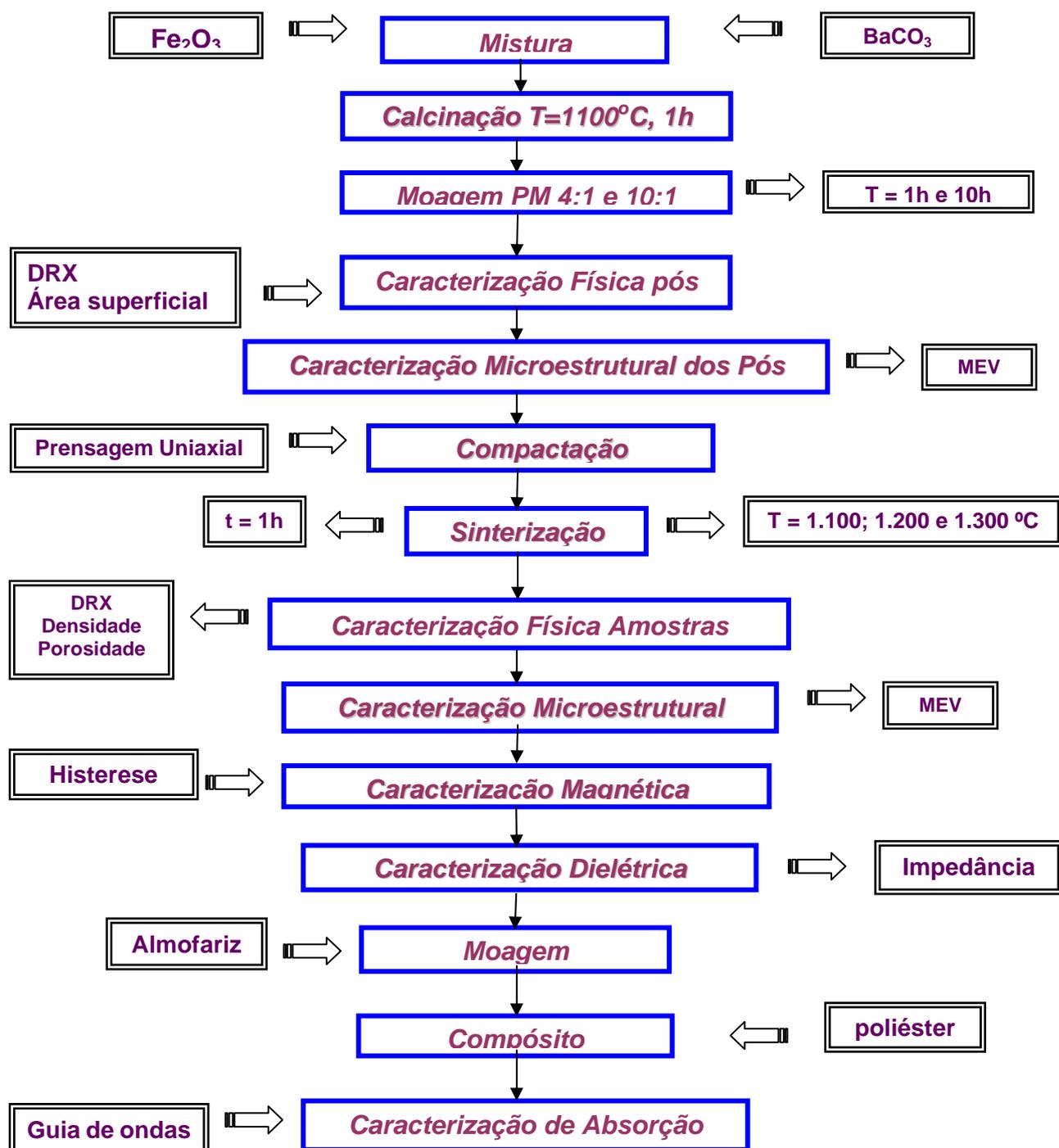


Figura 4.1 Fluxograma para obtenção e caracterização da hexaferrita de bário.

4.1 Obtenção do pó da HFB

4.1.1 Materiais de Partida

Os materiais de partida podem variar grandemente com a composição mineral e química nominal, pureza, estrutura química e física, tamanho de partícula e preço [54]. Na escolha dos materiais de partida para fabricação de qualquer material cerâmico, devem ser considerados os fatores: pureza, tamanho e distribuição de partículas, reatividade e forma polimórficas do pó. Na maioria dos casos, o objetivo é obter um empacotamento máximo de partículas e uniformidade. A distribuição do tamanho e reatividade das partículas é importante na determinação da temperatura e do tempo de sinterização [55].

A hexaferrita de bário (HFB) foi obtida a partir da mistura dos pós de óxido de ferro (Fe_2O_3) e carbonato de bário (BaCO_3) com elevado grau de pureza, de 98,1% e 99,37%, respectivamente. Do Fe_2O_3 ou hematita é retirado o ferro (Fe) que é um elemento magnético de raio atômico igual a $1,26 \text{ \AA}$, e o BaCO_3 , forneceu o bário (Ba), que é um elemento químico não magnético de raio atômico igual $2,2 \text{ \AA}$. As características destes elementos influenciaram a condutividade e propriedades magnéticas.

4.1.2 Processamento dos Pós

A moagem de alta energia (MAE) é uma técnica de processamento mecânico que permite a produção de materiais homogêneos partindo da mistura de pós. Os materiais são moídos pelo impacto de bolas dentro de recipientes de aço (figura 4.2) que giram a alta velocidade, com a finalidade de modificar a morfologia e a distribuição do tamanho de partículas dos materiais de partida (pós). O objetivo da moagem é a diminuição do tamanho de partículas de um material sólido, visando ao aumento da superfície específica para acelerar a velocidade de reação de determinada matéria-prima (por ex. na queima), e misturar de modo mais uniforme, vários materiais. Devido esta

técnica de processamento ser bastante simples, efetiva, econômica e recente e os materiais de partida serem de fácil acesso e manuseio, nós o escolhemos para este trabalho.



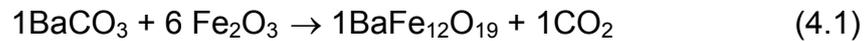
Figura 4.2 Recipientes com as bolas e os materiais de partida moídos.

As moagens foram feitas no laboratório de cerâmicas eletrônicas do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMA) da UFSCar-SP, por um moinho planetário–Pulverisette 7 (figura 4.3), que possui dois recipientes de aço, em que foram colocadas 5 esferas de aço de 11mm de diâmetro que giram à alta velocidade nos sentidos de translação e rotação do moinho.



Figura 4.3 Moinho Planetário Pulverisette.

Os óxidos Fe_2O_3 e BaCO_3 foram misturados nos recipientes do moinho, cuja quantidade foi definida em função do poder de moagem (PM) a serem utilizados no trabalho, que foram 4:1 e 10:1, obedecendo à estequiometria da composição:



Para obtenção da hexaferrita de bário, as quantidades de material a serem processados foram retiradas da seguinte forma:

- Massas do material
 - Ba = 137,33 uma
 - C = 12,011 uma
 - O = 15,9994 uma
 - Fe = 55,847 uma

- Peso molecular do carbonato de bário
 - $\text{BaCO}_3 = 137,33 + 12,011 + 3 \times 15,9994 = 197,34$ uma
- Massa do carbonato de bário
 - $1\text{BaCO}_3 = 1 \times 197,34 = 197,34$ uma

- Peso molecular do óxido de ferro
 - $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 2 \times 55,847 + 3 \times 15,9994 = 159,692$ uma
- Massa do óxido de ferro
 - $6\text{Fe}_2\text{O}_3 = 6 \times 159,692 = 958,152$ uma

- Massa Total $M_T = 197,34 + 958,153 = 1155,492$ uma

- Massa das bolas – 05 bolas de $\approx 5.51\text{g} = 27,90\text{g}$
- Poder de Moagem: 4:1 (4g de peso das bolas / 1g do material)
10:1 (10g de peso das bolas / 1g do material)

$$FatorMultiplificador(FM) = \left[\frac{MassaBolas/PoderMoagem}{MassaTotal} \right] \quad (4.2)$$

$$\text{para PM} = 4:1 \quad \rightarrow \quad FM = \left[\frac{27,9/4}{1155,492} \right] \quad \rightarrow \quad FM = 6,036 \times 10^{-3}$$

$$\text{para PM} = 10:1 \quad \rightarrow \quad FM = \left[\frac{27,9/10}{1155,492} \right] \quad \rightarrow \quad FM = 2,4145 \times 10^{-3}$$

- Massa do carbonato de bário para PM = 4:1

$$M_{(\text{BaCO}_3)} = 197,339 \times 6,036 \times 10^{-3} = 1,191\text{g} = 17,16\%$$

- Massa do óxido de ferro para PM = 4:1

$$M_{(\text{Fe}_2\text{O}_3)} = 958,153 \times 6,036 \times 10^{-3} = 5,783\text{g} = 82,9\%$$

- Massa Total para Poder de Moagem de 4:1

$$\sum \text{Massas} = M_{(\text{BaCO}_3)} + M_{(\text{Fe}_2\text{O}_3)} = 1,191 + 5,783 = 6,9749\text{g} \quad (4.3)$$

- Massa do carbonato de bário para PM = 10:1

$$M_{(\text{BaCO}_3)} = 197,339 \times 2,4145 \times 10^{-3} = 0,476\text{g} = 17,16\%$$

- Massa do óxido de ferro para PM = 10:1

$$M_{(\text{Fe}_2\text{O}_3)} = 958,153 \times 2,4145 \times 10^{-3} = 2,3134\text{g} = 82,9\%$$

- Massa Total para Poder de Moagem de 10:1

$$\sum \text{Massas} = M_{(\text{BaCO}_3)} + M_{(\text{Fe}_2\text{O}_3)} = 0,476\text{g} + 2,314\text{g} = 2,7898\text{g} \quad (4.4)$$

Os poderes de moagem demonstraram que as quantidades de Fe_2O_3 devem ser maiores que as de BaCO_3 e que, quanto maior poder de moagem, menor será a quantidade dos materiais de partida a serem processados, o que resulta em uma maior reatividade. Estes materiais foram primeiramente misturados em moinho planetário por 10 minutos, a fim de obtermos uma mistura mais homogênea.

4.1.3 Calcinação

A calcinação visa eliminar os aditivos introduzidos no processamento e promover as transformações de fase através da decomposição dos elementos do sistema, e ainda, influenciar no tamanho e distribuição de partículas e da porosidade. A fim de se obter a fase hexaferrita com materiais de partida misturados por MAE, foi utilizada a temperatura de 1100°C, durante o processo de calcinação. Para isto, estes materiais foram colocados em um forno programável Lindenberg do laboratório de cerâmicas do DEMA-UFSCar e submetidas a esta temperatura por uma hora, com taxa de aquecimento de 10°C/min e taxa de resfriamento de 20°C/min. A reação de estado sólido para formação da HFB, durante a calcinação é feita em duas etapas [11]:

- Descarbonização e formação da monoferrita



- Difusão do bário em oxido de ferro



A reação de estado sólido para a formação da hexaferrita de bário, a decomposição do carbonato é do tipo condensação, visto que há liberação de CO₂ e formação de fase sólida.

4.2 Caracterização Física da HFB

A caracterização física consiste em acompanhar a evolução das propriedades microestruturais resultante das condições de moagem e tratamentos térmicos. Para isso, devemos identificar as fases dos materiais de partida e do material final (HFB) por difração de raios X e efetuar as medidas de área superficial específica, densidade aparente e porosidade.

4.2.1 Identificação de Fases

A técnica da Difração de Raios X (DRX) foi utilizada a fim de identificar as fases cristalinas presentes nos pós e em cada amostra sinterizada, com diferentes poderes de moagem e tratamento térmico.

Para realização destes ensaios, os materiais de partida, as misturas destes materiais com PM's 4:1 e 10:1, as misturas calcinadas a 1100°C e as amostras sinterizadas a 1100°C, 1200°C e 1300°C, foram levadas ao difratômetro de raio X, modelo Siemens D5005 (figura 4.4), operando com radiação $\text{CuK}\alpha$, à velocidade de 0,033°/min, com ângulo de difração 2θ variando de 20° a 80°, a fim de identificarmos as fases presentes. A aquisição dos dados foi feita através de um software denominado Diffracplus Eva.



Figura 4.4 Difratômetro de Raio X, modelo Siemens D5005.

4.2.2 Área Superficial Específica

A textura de um sólido é definida pela disposição e dimensões relativas dos diferentes elementos constituintes. No caso de materiais porosos, depende principalmente da morfologia das partículas cuja determinação envolve normalmente medidas de área específica, volume de poros, distribuição de partículas e forma de poros e de partículas. Ao colocar um sólido finamente dividido em contato com um gás, ocorre diminuição progressiva da pressão parcial do gás e um aumento do peso do sólido. Este fenômeno denominado de adsorção resulta de interações físicas ou químicas entre as moléculas de gás e os átomos da superfície do sólido [56]. O método BET (Brunauer, Emmett e Teller) é um modelo para determinação da área específica de sólidos a partir das isotermas de adsorção. A área específica (S_{BET}) é tomada como o valor mais provável da área que mede a superfície de um sólido; sendo definida como a área superficial de um gás multiplicada pelo número de moléculas contidas no volume de um gás necessário para recobrir inteiramente a superfície de um grama de sólido com uma camada monomolecular (V_m). Assim sendo, tomando-se o valor de $V_m(\text{cm}^3/\text{g})$ nas condições normais de temperatura (273K) e pressão (760mmHg) e considerando a adsorção de nitrogênio a 77K, temos:

$$S_{BET} (m^2 / g) = 4,37V_m \quad (4.7)$$

Na medição da área superficial específica pelo método BET, foi utilizado o equipamento Micromeritics modelo Gemini 2370, que mede áreas específicas de até $0,01\text{m}^2/\text{g}$, com excelente precisão usando nitrogênio.

4.2.3 – Densidade Aparente e Porosidade

A densidade de um material é resultado do empacotamento das partículas, que é função da morfologia das mesmas. Em um compacto sinterizado, a densidade aparente é influenciada pela presença de partículas de diferentes tamanhos que afetam o empacotamento. A densidade aparente das amostras sinterizadas foi feita pelo método de imersão, ou princípio de Arquimedes, em que se coloca o material dentro de um volume de água, alterando o seu peso pelo empuxo e porosidades presentes do material. Para isso, utiliza-se a equação:

$$D_A = \left(\frac{m_s}{m_U - m_I} \right) \cdot \rho \quad (4.8)$$

onde m_s é a massa a seco da amostra, m_u é a massa úmida, m_i é a massa imersa em gramas (g) e ρ é a densidade da água em g/cm^3 . A densidade teórica da HFB é $4,90\text{g/cm}^3$.

As porosidades aparentes das amostras foram retiradas através da equação:

$$P_A = \left(\frac{P_U - P_S}{P_U - P_I} \right) \times 100\% \quad (4.9)$$

onde os índices se referem às porosidades medidas a úmido, a seco e quando imersas.

4.3 Compactação

A compactação consiste em dar forma aos pós. Para este fim, foi adicionado às 1,20g de pó das amostras, o ligante PVA (álcool polivinílico) com 2% do peso do pó, a fim de melhorar a resistência mecânica ou energia de coesão das partículas e foi utilizada uma prensagem uniaxial por uma prensa hidráulica manual em um molde cilíndrico de 12,9mm de diâmetro a uma pressão de 4 ton (300MPa), obtendo pastilhas de 12,9mm de diâmetro por 2,0mm de espessura.

Estas amostras foram moídas novamente em um almofariz de aço e depois o pó de HFB foi misturado com resina (cola) poliéster Milflex, na proporção de 2:1 de peso da resina por hexaferrita; a mistura foi colocada em moldes de vidro com as dimensões dos guias de ondas por 24 horas, conforme pode ser visto na figura 4.5. Foi utilizada vaselina líquida nas paredes dos moldes de vidro, a fim de evitar que o compósito aderisse às paredes dos mesmos. Estas amostras foram ainda lixadas seqüencialmente (lixas 100, 400 e 600), visando diminuir a espessura do corpo de prova para 2mm e obter uma superfície lisa.



Figura 4.5 Amostras de MARE's nos moldes de vidro com dimensões dos guias de ondas.

Outras amostras foram confeccionadas por prensagem uniaxial numa prensa hidráulica manual, onde em um molde de aço retangular de dimensões internas de 10mm x 23mm, que são as dimensões dos guias de ondas, foram colocadas 2 gramas do pó com 2% do peso de PVA e prensadas em uma prensa manual a 5 ton (213MPa).

4.4 Tratamento Térmico ou Sinterização

A sinterização consiste em aquecer o compactado a temperaturas inferiores às do ponto de fusão do principal constituinte em condições controladas de tempo e ambiente [57]. Ela objetiva a melhorar a densidade e analisar a temperatura, na qual as propriedades são prejudicadas. Durante o processamento usual de materiais cerâmicos, os pós são compactados e então queimados em uma temperatura suficiente para desenvolver as propriedades desejadas. Durante o processo de queima, mudanças podem ocorrer, por causa da decomposição ou transformação de fase em outras fases presentes. Além disso, com a queima de partículas, há um aumento do tamanho de grão, mudanças na forma, tamanho e número de poros, ocasionando uma diminuição da porosidade [58]. A sinterização das pastilhas cilíndricas foi realizada em um forno Lindenberg do laboratório de cerâmicas do DEMA-UFSCar (figura 4.6), com programador de temperatura, nas temperaturas de 1100°C, 1200°C e 1300°C, em que as pastilhas permaneceram por 1 hora nessas temperaturas sobre um suporte refratário, utilizando taxa de aquecimento e 10°C/min e taxa de resfriamento de 20°C/min.

As amostras retangulares feitas com as dimensões dos guia de ondas, tiveram tratamento térmico a 750°C, em um forno de temperatura programável Quimis Q-318D24, do laboratório de materiais do CEFET-MA, também com taxa de aquecimento de 10°C/min e de taxa de resfriamento de 20°C/min, a fim de melhorar a resistência mecânica e o manuseio das amostras



Figura 4.6 Forno Programável Lindenberg usado na sinterização das amostras.

4.5 Caracterização Microestrutural

A microestrutura dos materiais é definida pelo tipo, estrutura, número, forma e topologia dos arranjos das fases e defeitos na rede, ou seja, de características estruturais que incluem composição, tamanho e distribuição de grãos, que podem ser controlados pelas técnicas de processamento e sinterização. Normalmente, as superfícies das amostras são cuidadosamente preparadas, a fim de revelar os detalhes importantes da microestrutura. Logo, para analisarmos por microscopia eletrônica de varredura (MEV), alguns procedimentos foram necessários, como embutimento, desbastes e polimento das amostras. Para lixamento das amostras, foi utilizada lixa de números 240, 400 e 600. Para polimento superficial, utilizou-se uma politriz automática modelo minimet 1000, com pastas de diamante de $1\mu\text{m}$ e $6\mu\text{m}$ e suspensão de alumina de $0,3\mu\text{m}$. As amostras dos pós moídos com PM's 4:1e 10:1, e as amostras cilíndricas sinterizadas foram observadas no equipamento MEV ZEISS, mostrado na figura 4.7.



Figura 4.7 Microscópio Eletrônico de Varredura ZEISS

4.6 Caracterização Magnética

Esta caracterização consiste na obtenção das curvas de magnetização das amostras através do permeâmetro Magnetech MRP-1 (figura 4.8), a fim de analisar as propriedades como permeabilidade, magnetização de saturação e coercividade. O magnetech é um instrumento composto por um eletromagneto, fonte de potência, sonda hall, bobina de compensação, controlador e plotter. As intensidades de campo magnético são medidas pela sonda Hall, colocada entre os pólos do eletromagneto. As variações de intensidades são enviadas ao plotter que as reproduz nas curvas de histerese. Para imantação das amostras, foi aplicado um campo magnético com o máximo de 8,4KOe.



Figura 4.8 Permeâmetro Magnetech MRP-1

4.7 Caracterização Dielétrica

A caracterização dielétrica das amostras de HFB foi feita por um analisador de impedância HP4291A, na faixa de frequência de 300MHz a 1,1GHz. Ele faz a medição simultânea dos parâmetros de permissividade e $\tan\delta$ das amostras nos dois canais do equipamento

4.8 Caracterização de Absorção ou Refletividade

O método de reflectometria tem como objetivo medir a refletividade de uma camada de material aplicada sobre uma superfície metálica, comparando-se com a produzida por uma superfície limpa. Neste método, os sinais de microondas são transmitidos em guias de ondas retangulares, operando no modo TE_{10} , também chamado modo dominante do guia. Na maior parte das aplicações práticas, as dimensões do guia são projetadas de modo que somente o modo dominante se propague na frequência de operação.

Para caracterização de absorção pelo método de refletividade em guia de ondas, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Gerador de Onda Quadrada (kit de microondas) com as seguintes medidas:
 - Frequência de operação $f = 1 \text{ KHz}$
 - Amplitude $A = 4 V_{pp}$
 - Tensão eficaz $V_{rms} = 2,25 \text{ V}$
- Gerador de Sinal de RF (HP8685D)
 - Faixa de Frequência $F_0 = 9,5 \text{ GHz a } 12 \text{ GHz}$
 - Índice de Modulação $\beta = 50\%$
 - Nível de Transmissão $N = 15 \text{ dBm}$
- Osciloscópio Digital TDS 1012
- Kit de Microondas ED 3000

O kit didático de microondas (ED3000) é composto por diversos componentes de guias de ondas, projetados para atuarem com os sinais na faixa da banda X (8GHz a 12GHz). Para as medidas de absorção de microondas foi utilizado o método de reflectometria em guia de ondas, onde foi utilizado um gerador de sinal de RF (HP 8685D), que opera na faixa de 2,3GHz a 13,0GHz com um nível de 15dBm, um acoplador direcional que tem a propriedade de separar os sinais incidentes dos sinais refletidos e um osciloscópio para visualização e medidas de absorção do sinal. Neste experimento, um gerador de onda quadrada de 1KHz modula a portadora de alta frequência do gerador de RF, sendo retirado na saída do acoplador, após sofrer demodulação do sinal por um detector a cristal.

A figura 4.9 mostra a montagem da instrumentação utilizada nos ensaios de medidas de refletividade por guia de ondas.



Figura 4.9 Instrumentação para medidas de refletividade por guia de ondas.

Primeiramente, posicionou-se uma placa refletora metálica (referência) na saída do acoplador e com os geradores (RF, áudio) ligados, medimos a atenuação do sinal, variando-se a frequência em passos de 10 MHz, na faixa de 9,5 GHz a 12 GHz. Depois, substituiu-se a placa refletora por uma amostra de MARE em um porta amostra e uma carga terminal após a amostra. Faz-se, então, as medidas de refletividade, a fim de se observar a absorção do sinal pelo MARE. A atenuação resultante será dada pela diferença entre a amplitude do sinal refletido pela placa de curto circuito (referência) e a amplitude do sinal refletido pelos MARE's. Como os níveis de geração de sinais de RF em microondas são baixos e todos os componentes do sistema sofrem atenuações, os níveis de recepção foram bem pequenos. Foi utilizado para as medidas de atenuação um osciloscópio digital Tektronix TDS 1012, com escala mínima de 2mV/Div., em que os níveis de tensão de saída, abaixo de $0,8\text{mV}_{\text{rms}}$ foram desconsiderados (muito ruído).

5 ANÁLISE DE RESULTADOS

Os resultados apresentados a seguir foram obtidos dos procedimentos adotados na metodologia descrita no item anterior.

5.1 Difração de Raios X

5.1.1 Materiais de Partida e suas misturas.

Os materiais de partida Fe_2O_3 e BaCO_3 e a sua mistura por um período de 10 minutos, com poderes de moagem de 4:1 e 10:1, foram colocadas no difratômetro, para observação da evolução das estruturas e identificação das fases presentes. Esses difratogramas são mostrados na figura 5.1.

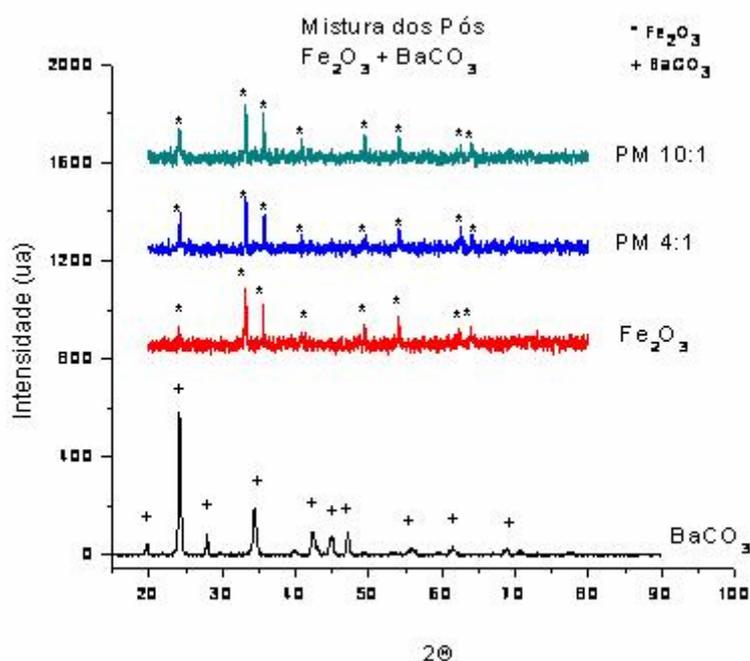


Figura 5.1 Difratogramas dos materiais de partida e de sua mistura com poderes de moagem de 4:1 e 10:1.

É importante ressaltar que as misturas dos materiais de partida no moinho de alta energia por apenas 10 min, com PM's 4:1 e 10:1, não promoveram nenhuma reação, sendo obtida apenas uma mistura mais homogênea dos materiais de partida e que seus efeitos foram desprezados considerando que os espectros são muito próximos.

5.1.2 Materiais Calcinaados

A mistura dos materiais de partida, moídos com PM's 4:1 e 10:1, foram calcinados à temperatura de 1100°C por 1 hora, apresentando os difratogramas mostrados na figura 5.2.

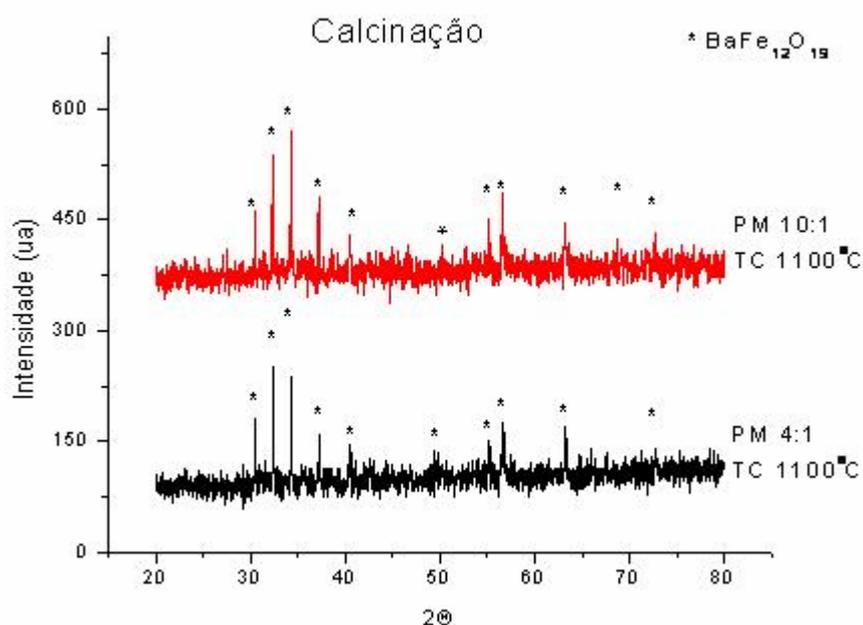


Figura 5.2 Difratogramas dos pós calcinaados.

Observa-se que, após calcinação dos materiais de partida a 1100°C por 1 hora, houve transformação de fase nas amostras (misturas), cujas massas foram obtidas dos PM's 4:1 e 10:1, obtendo-se a fase hexaferrita de bário (BaFe₁₂O₁₉).

5.1.3 Materiais Sinterizados

Depois de calcinados, os pós foram moídos com poderes de moagem de 4:1 e 10:1 em tempos de moagem de 1 hora e 10 horas. As amostras em pó obtidas após a moagem foram compactadas em forma de pastilhas cilíndricas e sinterizadas a temperaturas de 1100°C, 1200°C e 1300°C por 1 hora. As figuras 5.3, 5.4 e 5.5 a seguir mostram os difratogramas das amostras de HFB, obtidas após essas sinterizações.

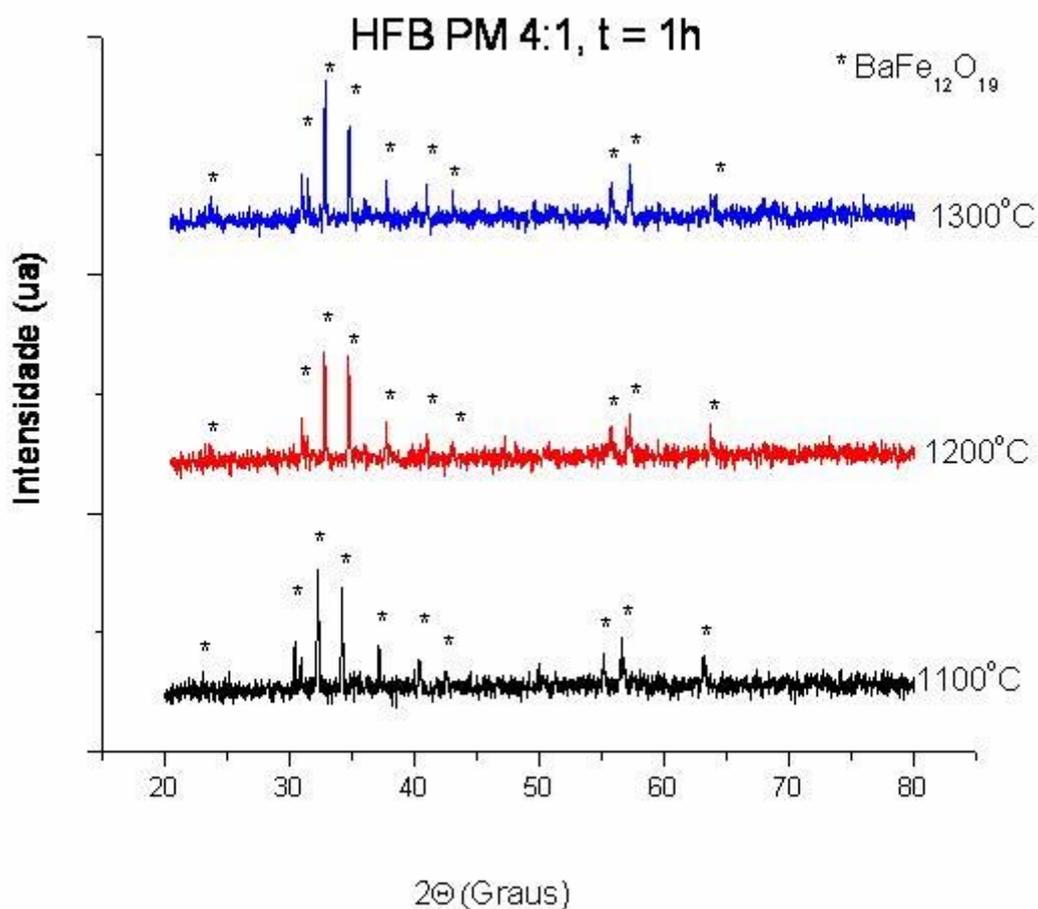


Figura 5.3 Difratogramas das amostras de HFB processadas com PM 4:1, em 1h e sinterizadas a temperaturas de 1100°C, 1200°C e 1300°C.

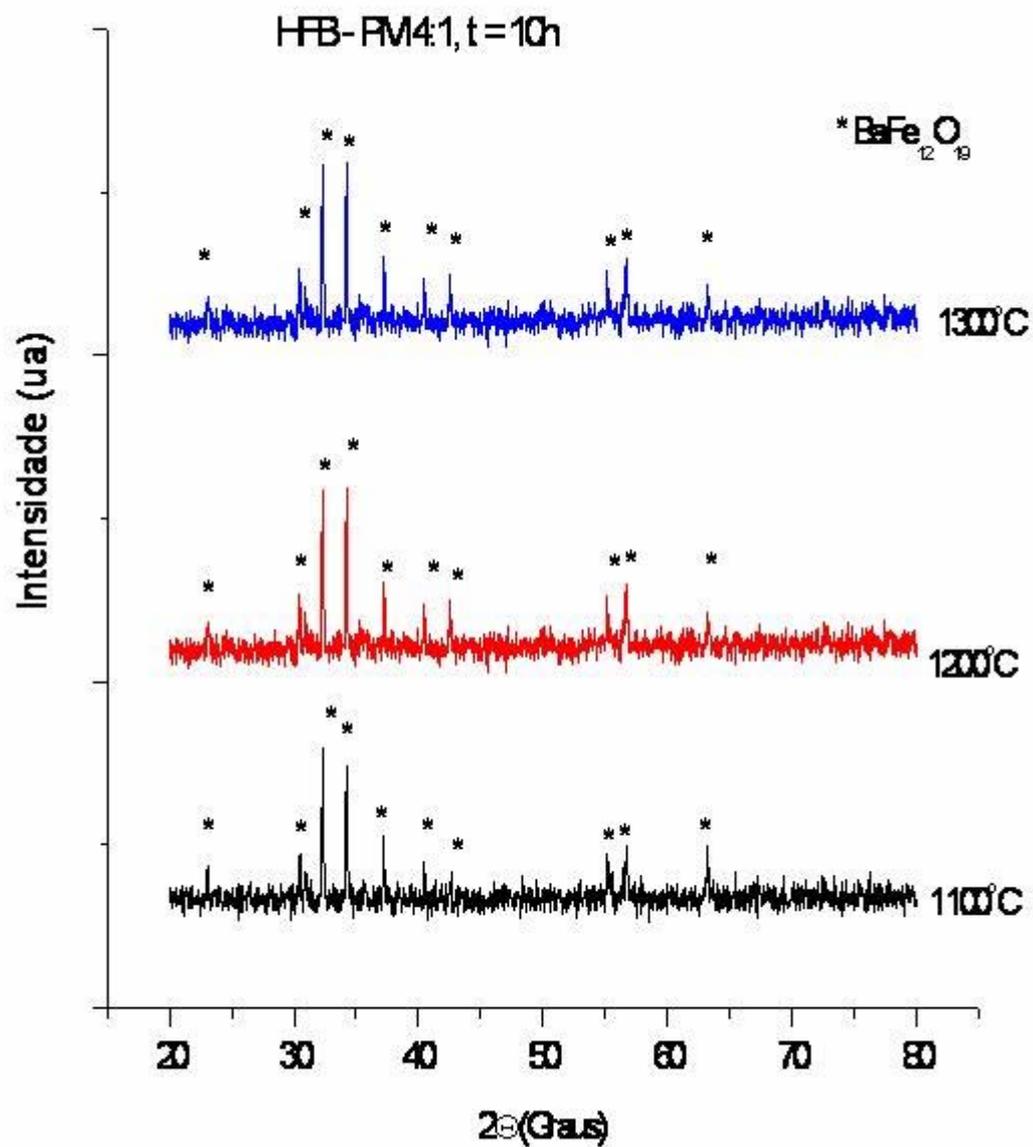


Figura 5.4 Difratogramas das amostras de HFB processadas com PM 4:1, em 10h e sinterizadas a temperaturas de 1100°C, 1200°C e 1300°C.

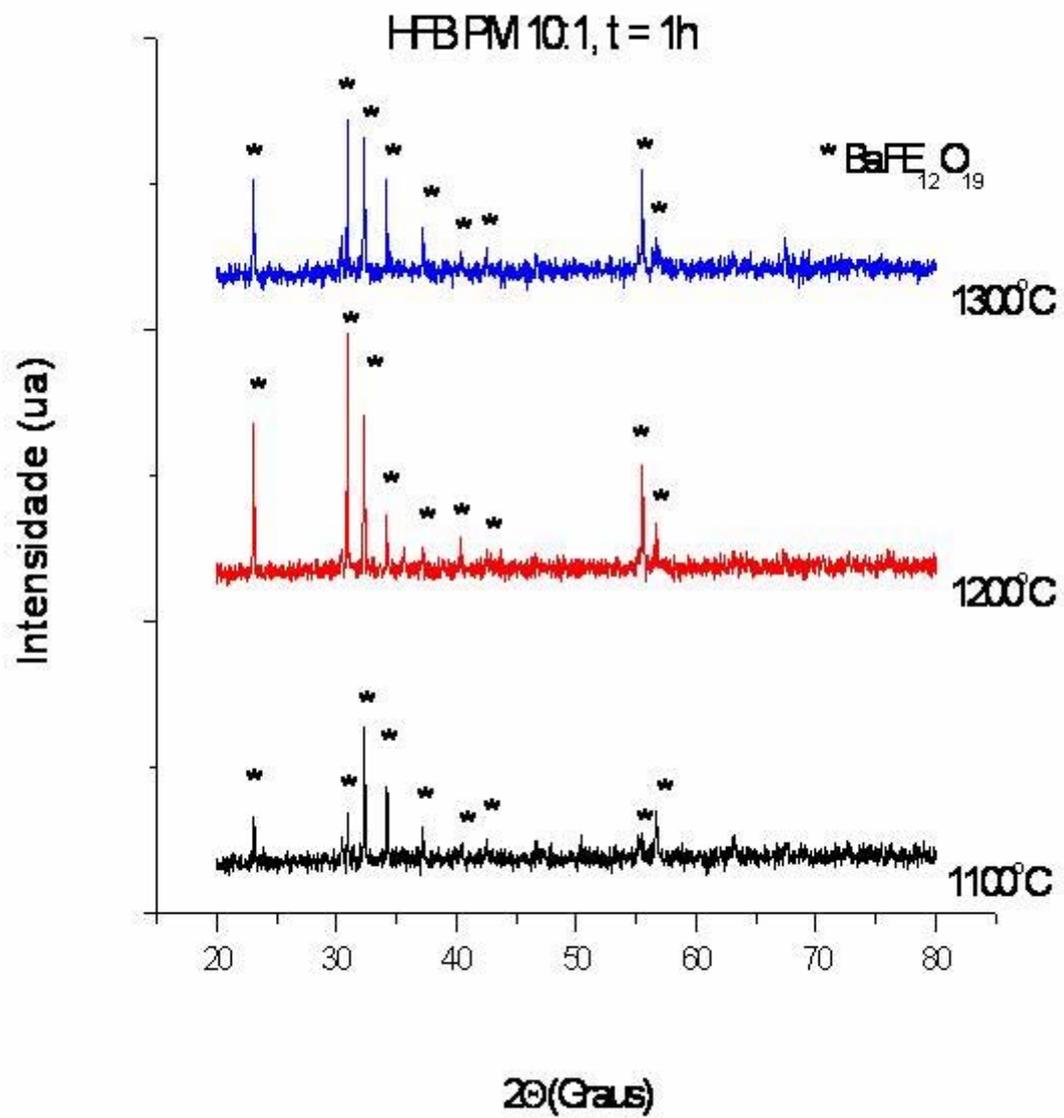


Figura 5.5 Difratoogramas das amostras de HFB processadas com PM 10:1, em 1h e sinterizadas a temperaturas de 1100°C, 1200°C e 1300°C.

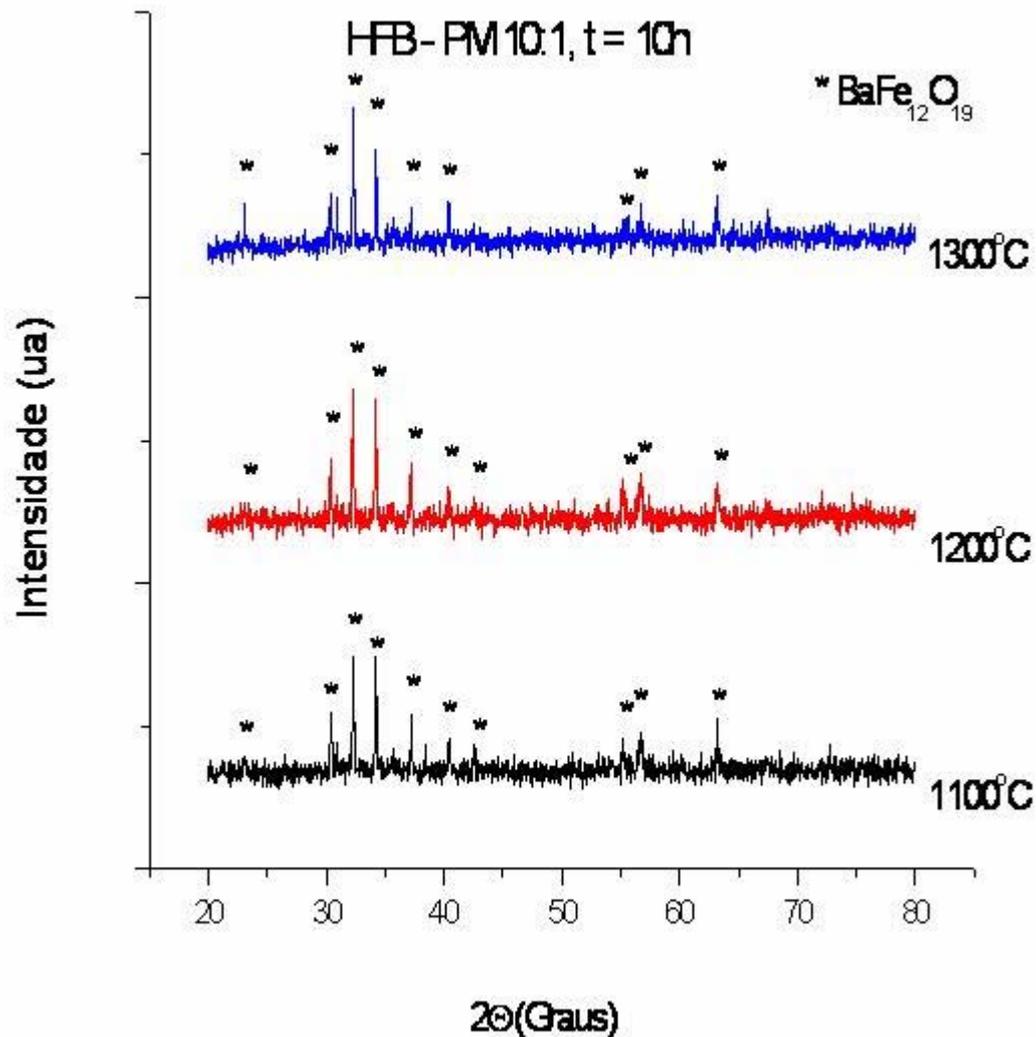


Figura 5.6 Difratomogramas das amostras de HFB processadas com PM 10:1, em 10h e sinterizadas a temperaturas de 1100°C, 1200°C e 1300°C.

Observa-se nos difratogramas das figuras (5.3 - 5.6) a formação da fase hexaferrita após calcinação em todas as amostras, para todos os poderes de moagem, tempos de moagem e temperaturas de sinterização utilizadas no processamento e que não há formação de fases de impurezas como o BaFe_2O_4 . E ainda, que com o aumento do tempo de moagem, há uma diminuição das intensidades das reflexões basais, o que demonstra uma diminuição do tamanho de cristalito.

5.2 Área Superficial Específica

A área superficial dos materiais de partida e das amostras de pó de HFB permitiu analisar a diminuição do tamanho de partículas durante as etapas do processamento. Essa variação do tamanho de partículas influenciará nas propriedades magnéticas do material.

Utilizando o método BET para medição da área superficial específica, foram encontrados os valores mostrados na figura 5.7.

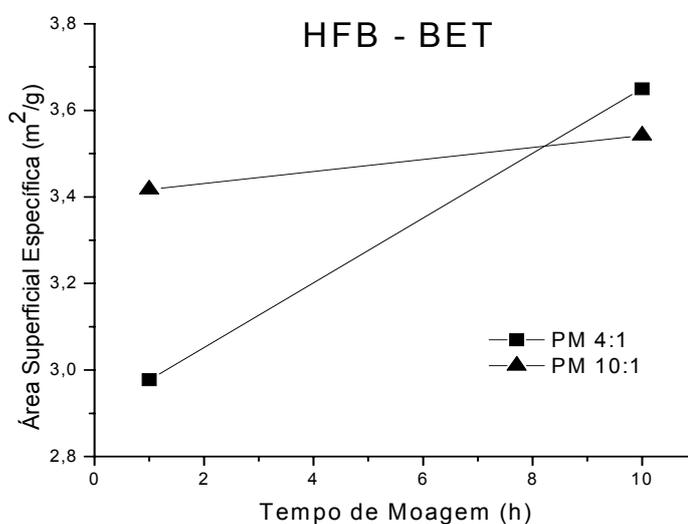


Figura 5.7 Área Superficial Específica das Amostras de HFB.

Observa-se em todas as amostras de HFB que houve um aumento da área superficial específica, em função do tempo de moagem, sendo que a variação é maior para área específica com menor PM, ou seja, o menor valor da área superficial específica foi para o menor poder de moagem com o menor tempo de moagem (PM 4:1, 1h, 1100°C), e a maior área específica foi para o menor poder de moagem com o maior tempo de moagem (4:1, 1h, 1300°C). A variação da área superficial específica das amostras de HFB foi de 2,95 m²/g a 3,72 m²/g.

5.3 Densidade e Porosidade

A densidade e porosidade influenciam bastante nas propriedades da HFB, pois os poros reduzem a resistência mecânica e a permeabilidade pelo impedimento do movimento das paredes de domínios [53] e aumentam a resistividade e a polarização por heterogeneidade.

As medidas de densidade aparente das amostras de HFB sinterizadas nas temperaturas de 1100°C, 1200°C e 1300°C foram realizadas pelo método de Arquimedes, como podem ser visualizadas nos gráficos da figura 5.8.

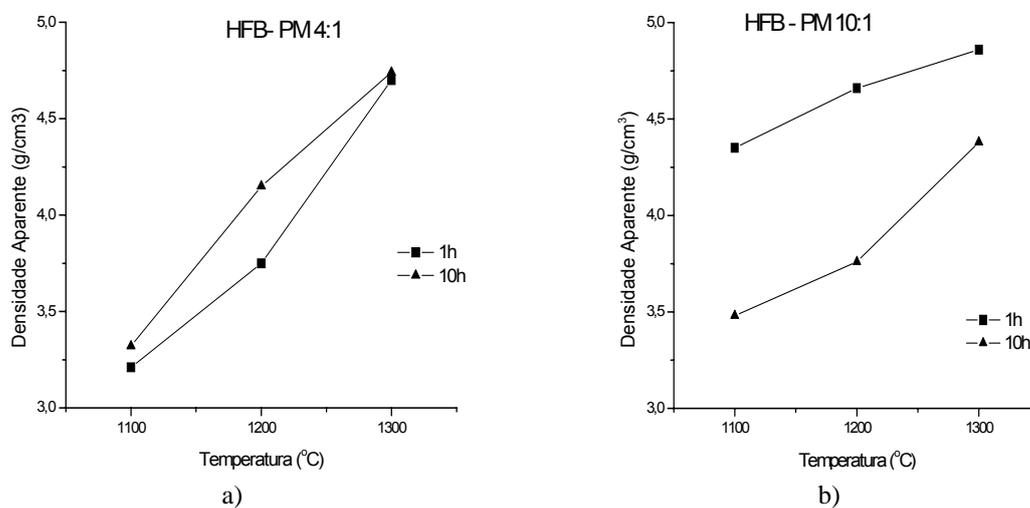


Figura 5.8 Densidade Aparente das amostras de HFB obtidas com poderes de moagem de: a) PM 4:1, b) PM 10:1

Observa-se uma maior variação da densidade aparente para a amostra com menor PM (4:1) e menor tempo de moagem para elevação de temperatura de sinterização, numa curva sempre ascendente. Para qualquer processamento, o aumento da temperatura de sinterização causa o aumento da densidade aparente, tendo obtido seus valores máximos e mínimos, nos processamentos PM 10:1, 1h, 1300°C e PM 4:1, 1h, 1100°C, respectivamente.

A porosidade aparente das amostras de HFB sinterizadas em função da variação de temperatura foi obtida conforme item 4.2.3, cuja variação pode ser vista na figura 5.9.

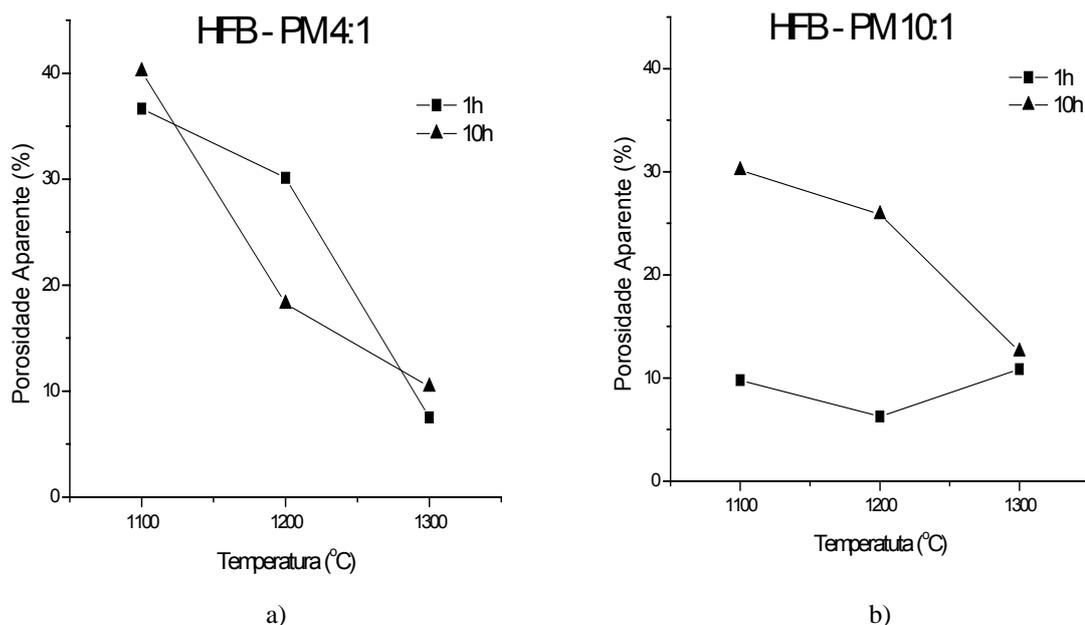


Figura 5.9 Porosidade aparente das amostras de HFB obtidas com poderes de moagem: a) PM 4:1 b) PM 10:1

Observa-se que para as amostras de HFB, obtidas com poder de moagem de 4:1, houve uma diminuição da porosidade para um aumento de temperatura. O mesmo comportamento acontece para aquelas processadas nas condições de PM 10:1, onde a porosidade inicialmente diminui quando a temperatura aumenta entre 1100°C e 1200°C. Contudo, para aquelas processadas nas condições de PM 10:1, 1h, observa-se que a porosidade passa a crescer quando a temperatura vai de 1200°C a 1300°C. A razão deste comportamento será apresentado nas discussões. A porosidade aparente das amostras de HFB variou de 6,26% a 40,18%, sendo o maior e menor valores, relativos aos processamentos PM 4:1, 1h, 1100°C e PM 10:1, 1h, 1200°C, respectivamente.

5.4 Caracterização Microestrutural

A caracterização microestrutural permite analisar a forma, o tamanho de partículas e sua distribuição, que podem ser controlados pela técnica de processamento e condições de sinterização.

A figura 5.10 mostra as micrografias das amostras de pó calcinadas de HFB, processadas e a influência do processamento na evolução da microestrutura.

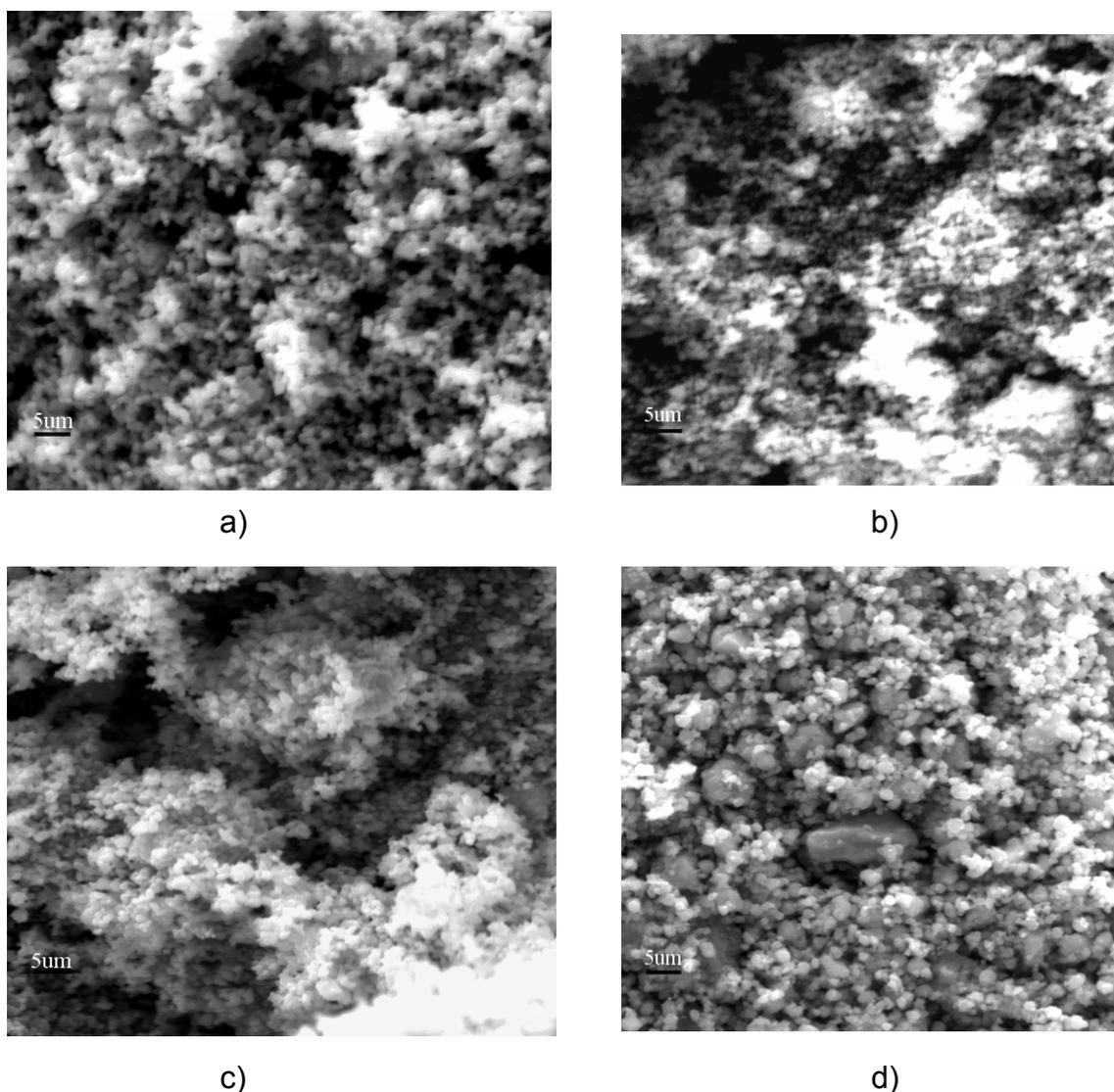


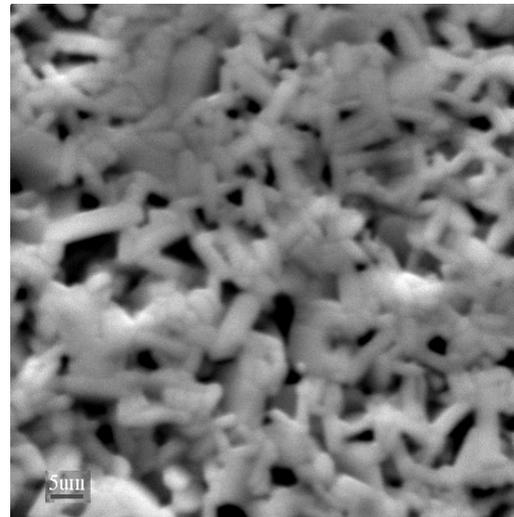
Figura 5.10 Micrografias dos pós de HFB, obtidos com os processamentos abaixo: a) PM 4:1, 1h b) PM 4:1, 10h c) PM 10:1, 1h
d) PM 10:1, 10h

Observa-se que os pós de HFB obtidos com PM 4:1 apresentaram partículas mais homogêneas, mas formando grandes aglomerados, os quais são reduzidos com o aumento do tempo de moagem. Para PM 10:1, observamos partículas maiores com uma distribuição menos homogênea e formação de aglomerados, sendo que, à medida que aumenta o tempo de moagem, os aglomerados diminuem de tamanho para qualquer PM.

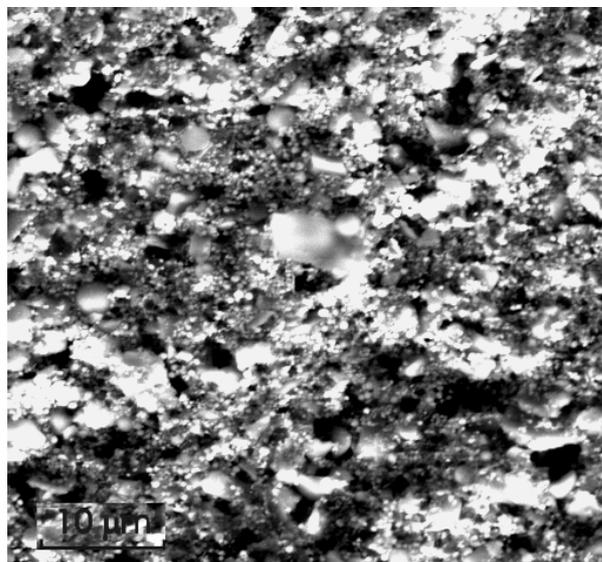
As micrografias apresentadas na figura 5.11 mostram a morfologia das amostras de HFB, obtidas com poder de moagem de 4:1, num tempo de moagem de 1h e sinterizados a temperaturas de 1100°C, 1200°C e 1300°C.



a)



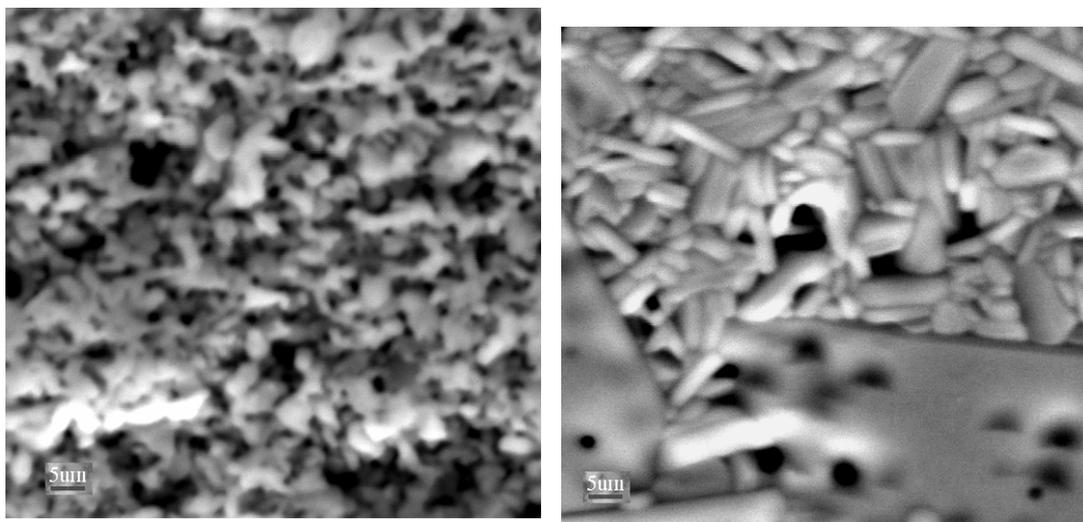
b)



c)

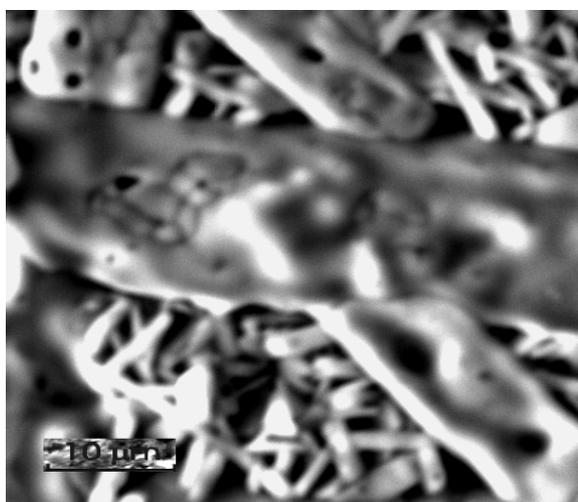
Figura 5.11 Micrografias das amostras de HFB, obtidas com PM 4:1 em 1h e sinterizadas a temperaturas de: a) 1100°C b) 1200°C e c) 1300°C

As micrografias da figura 5.12 mostram a morfologia das amostras de HFB, obtidas com poder de moagem de 4:1, num tempo de moagem de 10h e sinterizados a temperaturas de 1100°C, 1200°C e 1300°C.



a)

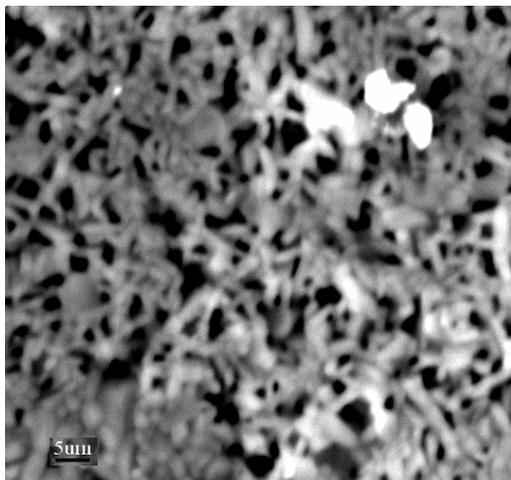
b)



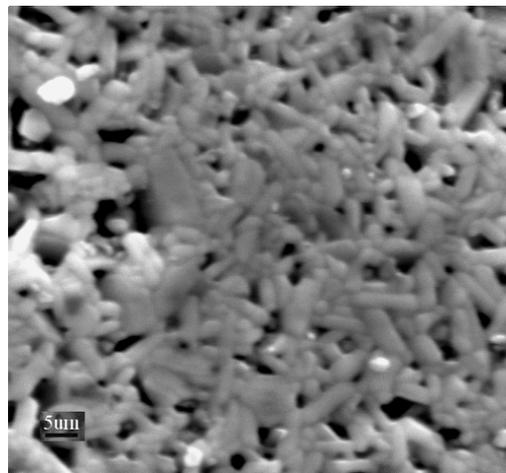
c)

Figura 5.12 Micrografias das amostras de HFB, obtidas com PM 4:1 em 10h e sinterizadas a temperaturas de: a) 1100°C b) 1200°C e c) 1300°C

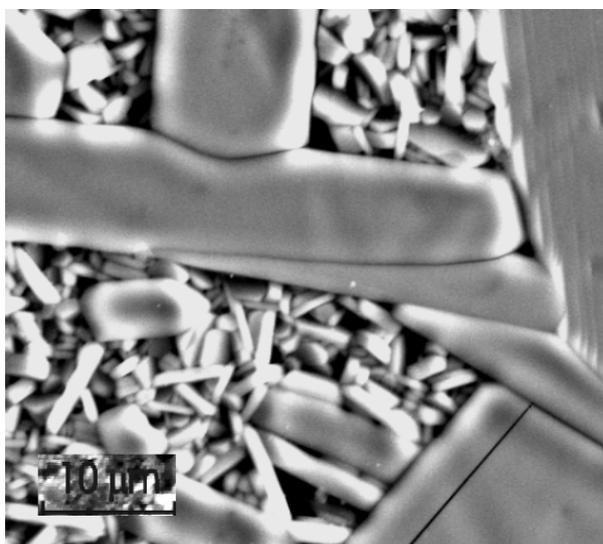
As micrografias apresentadas na figura 5.13 mostram a morfologia das amostras de HFB, obtidas com poder de moagem de 10:1, num tempo de moagem de 1h e sinterizados a temperaturas de 1100°C, 1200°C e 1300°C.



a)



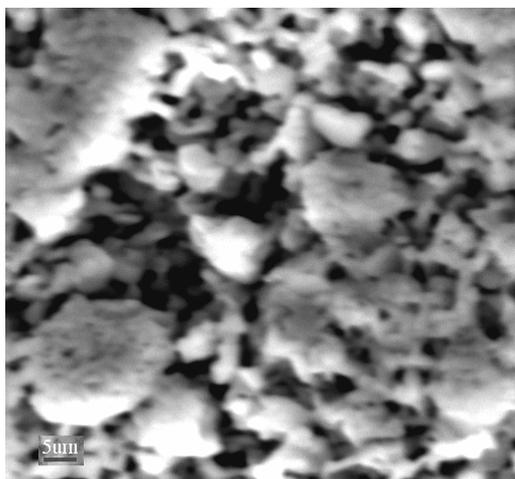
b)



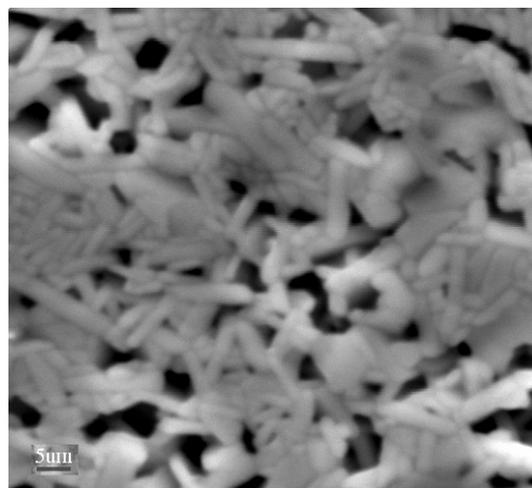
c)

Figura 5.13 Micrografias das amostras de HFB, obtidas com PM 10:1 em 1h e sinterizadas a temperaturas de: a) 1100°C b) 1200°C e c) 1300°C

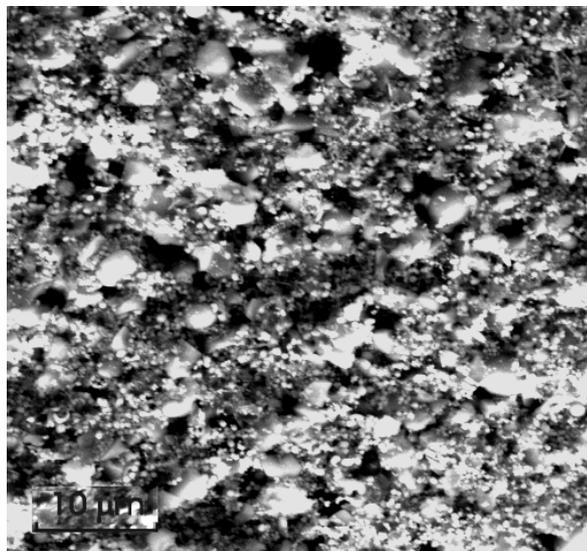
As micrografias apresentadas na figura 5.14 mostram a morfologia das amostras de HFB, obtidas com poder de moagem de 10:1, num tempo de moagem de 10h e sinterizados a temperaturas de 1100°C, 1200°C e 1300°C.



a)



b)



c)

Figura 5.14 Micrografias das amostras de HFB, obtidas com PM 10:1 em 10h e sinterizadas a temperaturas de: a) 1100°C b) 1200°C e c) 1300°C

As micrografias da figura 5.11 mostram que houve uma variação do tamanho do grão com a mudança da temperatura de sinterização. Na figura 5.11a, observa-se que as amostras obtidas no processamento PM 4:1, 1h e sinterizadas a 1100°C apresentam uma microestrutura com uma distribuição mais homogênea de tamanho de grãos e certo grau de porosidade. Na figura 5.11b, obtida com processamento PM 4:1, 1h, 1200°C, observa-se que houve aumento do tamanho de grãos devido a elevação da temperatura de sinterização, bem como uma diminuição da porosidade. Na figura 5.11c, de processamento PM 4:1, 1h, 1300°C, não foi possível observarmos as características microestruturais, porque o MEV utilizado não deu uma boa visualização da amostra. Logo, para este parâmetro de processamento (PM 4:1, 1h), observou-se que o aumento da temperatura de sinterização possibilitou a obtenção de uma microestrutura com grãos regulares maiores, o que favoreceu uma menor porosidade, elevando a densidade do material.

Nas micrografias da figura 5.12, observa-se que as amostras processadas com PM 4:1, e um tempo de moagem maior (10h), obtiveram um crescimento maior no tamanho de grãos com a elevação da temperatura. Na figura 5.12a, observa-se que as amostras obtidas no processamento PM 4:1, 10h e sinterizadas na temperatura de 1100°C, apresentam também uma microestrutura com tamanho de grãos homogêneo com certo grau de porosidade. Na figura 5.12b, obtida com processamento PM 4:1, 1h, 1200°C, observa-se um aumento do tamanho de grãos de forma irregular, com a elevação da temperatura de sinterização e uma diminuição da porosidade. Na figura 5.12c, observa-se também o crescimento dos grãos exagerados para o aumento de temperatura. Logo, para o parâmetro de processamento de PM 4:1, 10h, observa-se que o aumento de temperatura possibilitou a obtenção de uma microestrutura com grãos maiores e mais heterogênea, apresentando poros intragranulares.

Nas micrografias da figura 5.13 obtidas com processamento PM 10:1, 1h, observa-se em relação às processadas com PM 4:1, 1h, que houve diminuição da porosidade entre as temperaturas de 1100°C a 1200°C, enquanto na temperatura de 1300°C, a porosidade aumentou, devido ao crescimento dos grãos de forma exagerada e não uniforme. Nas micrografias da figura 5.13a, obtidas com processamento PM 10:1, 1h, observa-se uma microestrutura com elevada porosidade e grãos com tamanho uniforme. Na figura 5.13b, observa-se que os grãos cresceram com a elevação da temperatura com baixa porosidade e tamanhos uniformes. Na figura 5.13c, vê-se na microestrutura que houve um crescimento exagerado de grãos, porosidade elevada e tamanho de grãos bastante heterogêneo, o que contribuiu para a elevação da porosidade.

Nas micrografias da figura 5.14, obtidas com processamento PM 10:1, 10h, observa-se que houve uma aglomeração dos grãos, o que contribuiu para a elevação da porosidade em relação às amostras processadas com PM 10:1, 1h. Na figura 5.14a, vê-se a presença de grandes aglomerados, elevando a porosidade e tamanhos de grãos uniformes dentro dos aglomerados. Na figura 5.14b, observa-se uma microestrutura com crescimento de grãos devido ao aumento da temperatura de sinterização, os grãos têm tamanho uniforme e há menos aglomerados, o que contribuiu para a diminuição da porosidade. Na figura 5.14c, não foi possível observarmos as características microestruturais, porque o MEV não deu boa visualização da amostra.

5.5 Caracterização Magnética

A caracterização magnética das amostras de HFB, feita por um permeâmetro, permitiu o levantamento das curvas de histerese e observação dos valores de coercividade e magnetização. As figuras 5.15, 5.16, 5.17 e 5.18 mostram as curvas de histerese de amostras processadas com PM 4:1 e PM 10:1, em tempos moagem de 1h e 10h, sinterizadas a 1100°C, 1200°C e 1300°C.

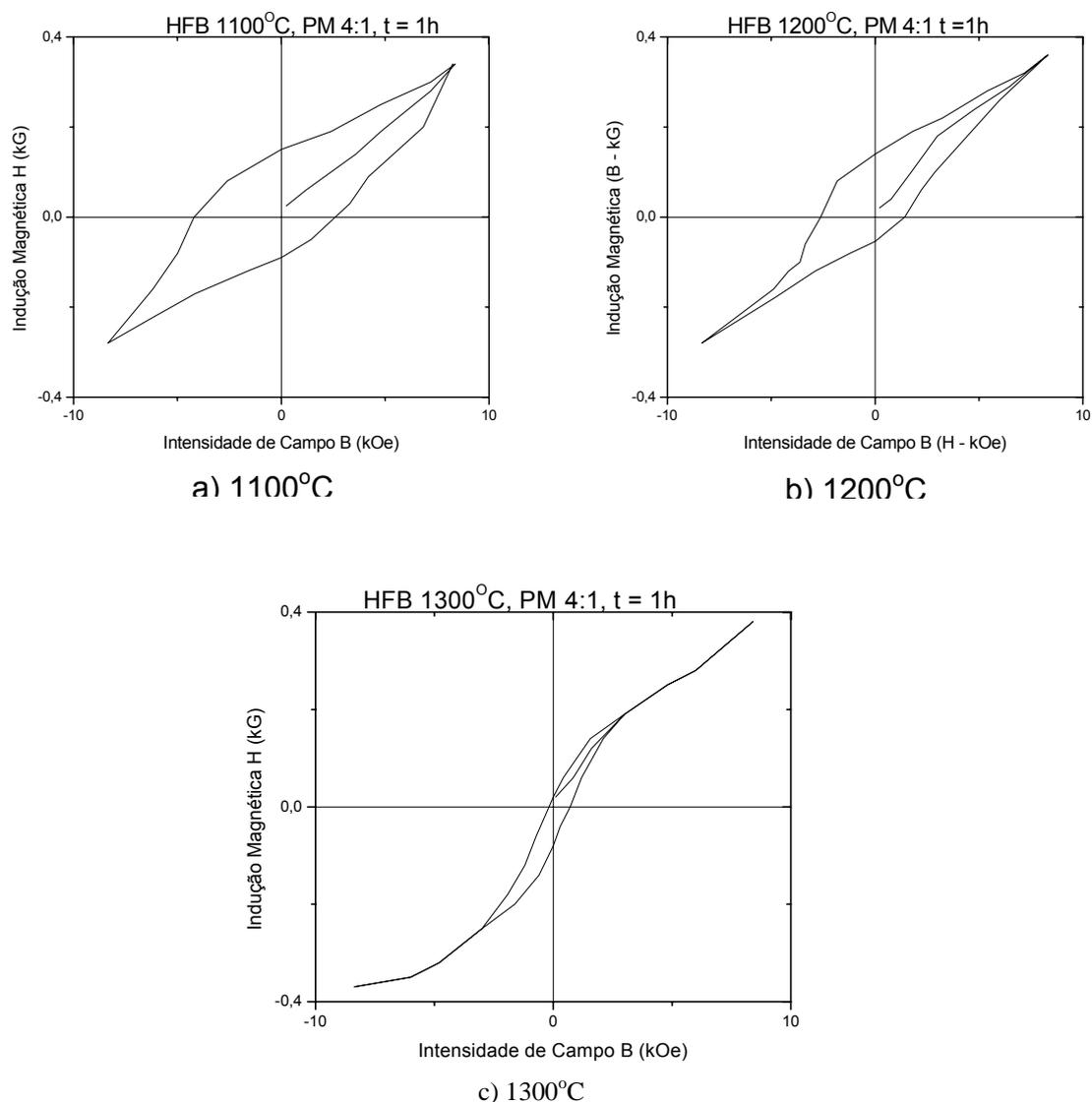
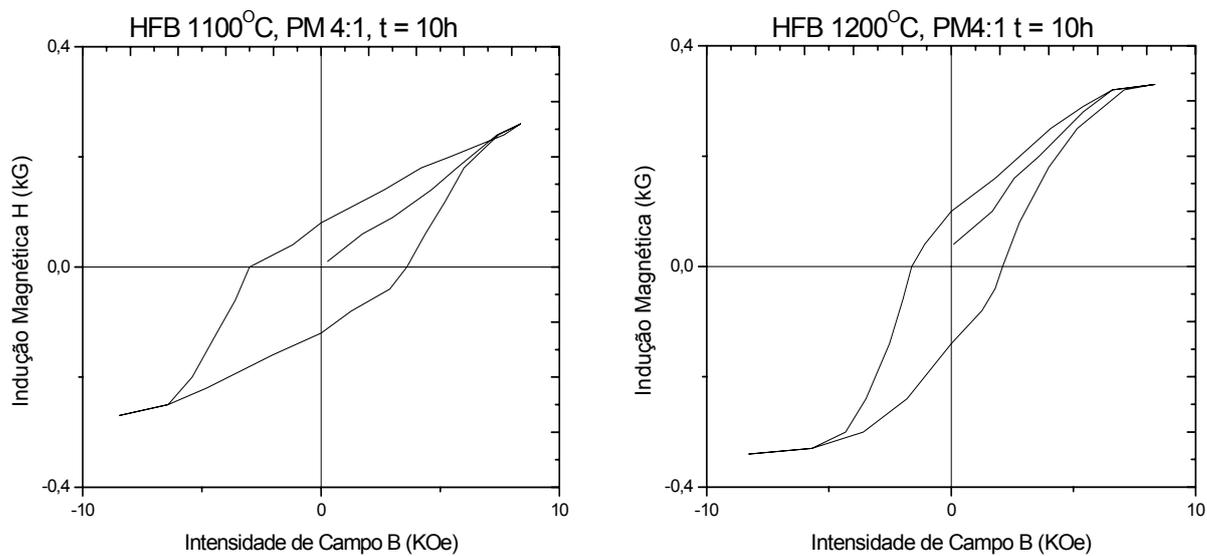
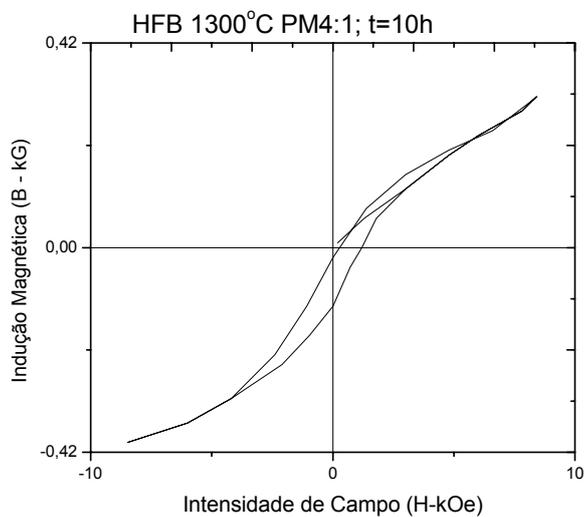


Figura 5.15 Curvas de histerese de amostras de HFB obtidas com PM 4:1 em 1h e sinterizadas: a) 1100°C b) 1200°C c) 1300°C



a) 1100°C

b) 1200°C



c) 1300°C

Figura 5.16 Curvas de histerese de amostras de HFB obtidas com PM 4:1 em 10h e sinterizadas: a) 1100°C b) 1200°C c) 1300°C

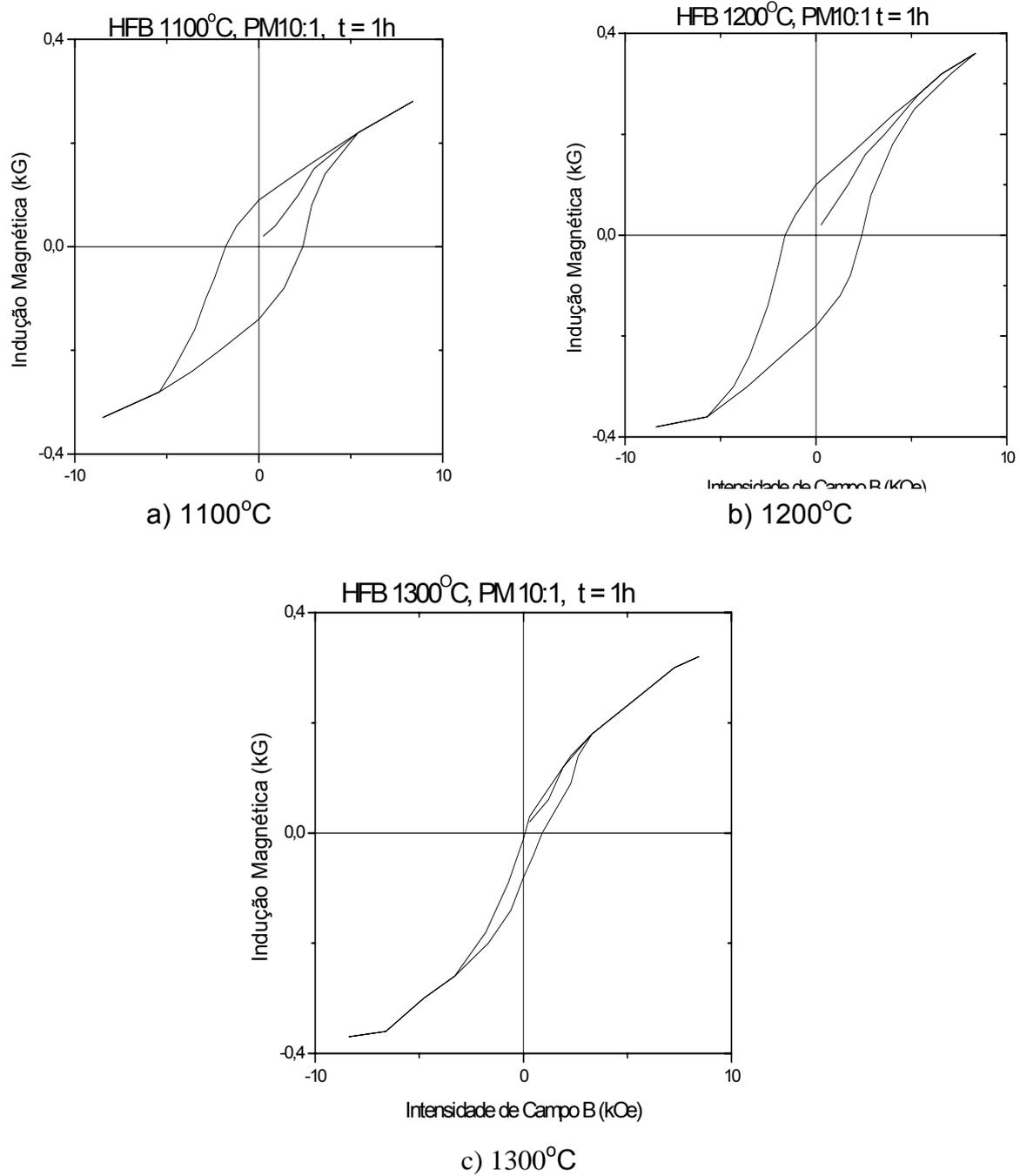
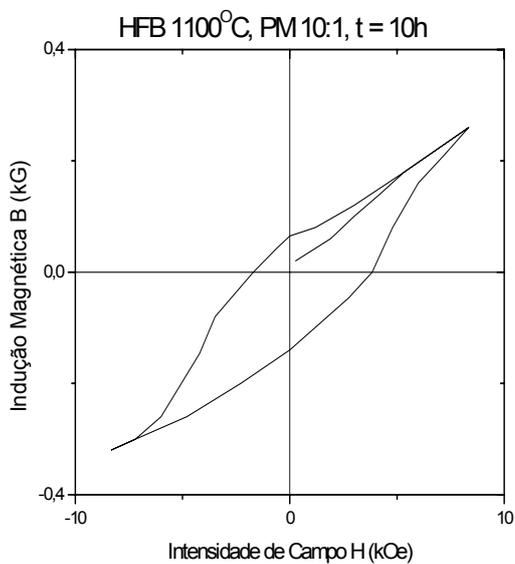
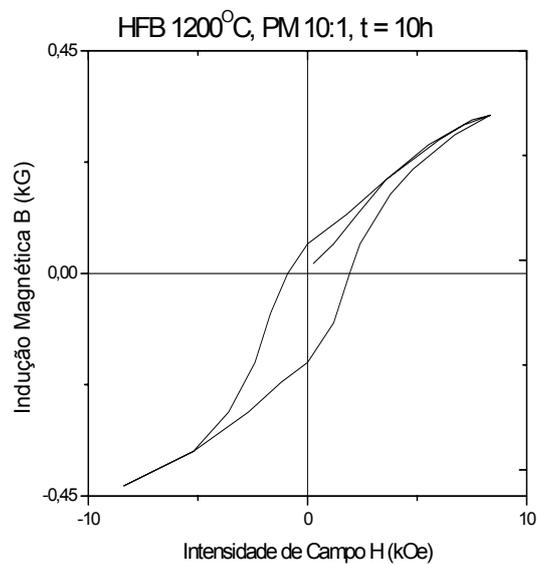


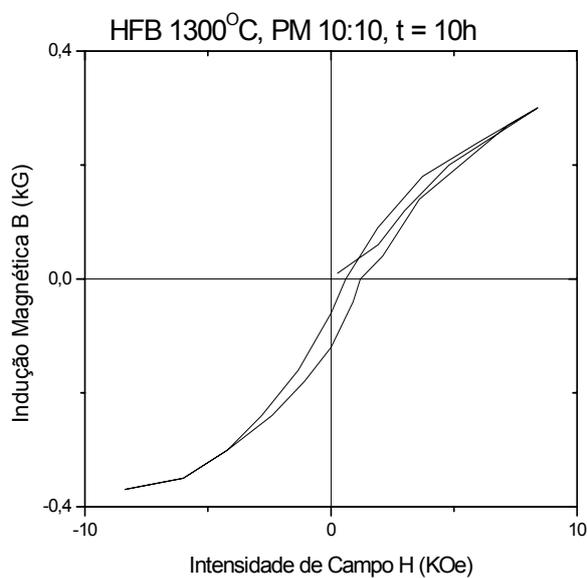
Figura 5.17 Curvas de histerese de amostras de HFB obtidas com PM 10:1 em 1h e sinterizadas: a) 1100°C, b) 1200°C, c) 1300°C



a) 1100°C



b) 1200°C



c) 1300°C

Figura 5.18 Curvas de histerese de amostras de HFB obtidas com PM 10:1 em 10h e sinterizadas: a) 1100°C, b) 1200°C, c) 1300°C

Os valores das propriedades magnéticas como coercividade (H_c), Remanência (B_r) e magnetização de saturação (H_s) das amostras, que foram retirados das curvas de histerese das figuras acima, são mostradas na tabela 5.1.

Tabela 5.1 Valores de propriedades magnéticas de amostras de HFB sinterizadas a temperaturas de 1100°C, 1200°C e 1300°C.

Amostras	H_c (KOe)	B_r (T)	B_s (T)
HFB PM 4:1, 1h, 1100°C	2,84	0,01	0,036
HFB PM 4:1, 1h, 1200°C	1,88	0,009	0,039
HFB PM 4:1, 1h, 1300°C	0,46	0,006	0,038
HFB PM 4:1, 10h, 1100°C	3,4	0,01	0,026
HFB PM 4:1, 10h, 1200°C	2,24	0,018	0,042
HFB PM 4:1, 10h, 1300°C	0,75	0,008	0,03
HFB PM 10:1, 1h, 1100°C	2,12	0,01	0,027
HFB PM 10:1, 1h, 1200°C	2,0	0,015	0,035
HFB PM 10:1, 1h, 1300°C	0,6	0,006	0,031
HFB PM 10:1, 10h, 1100°C	2,8	0,01	0,025
HFB PM 10:1, 10h, 1200°C	1,42	0,012	0,031
HFB PM 10:1, 10h, 1300°C	0,9	0,009	0,03

Observa-se que todas as curvas de histerese mostradas nas figuras 5.15, 5.16, 5.17 e 5.18 não apresentaram simetria com relação aos eixos do plano cartesiano. Isto se deveu ao equipamento de magnetização não estar calibrado na hora da medição e também devido à imprecisão no monitoramento do campo magnético aplicado. As figuras mostram também que os maiores valores de coercividade são obtidos nas amostras sinterizadas nas menores temperaturas e são as que possuem as maiores áreas de loop de histerese. Observa-se, ainda, que há um estreitamento ou diminuição do loop de histerese, quando elevamos a temperatura de sinterização, ou seja, quanto maior temperatura, mais estreito se torna o loop de histerese das amostras.

A amostra processada com menor poder de moagem e maior tempo de moagem (PM 4:1, 10h) foi a que obteve a maior coercividade e quando o poder de moagem foi de PM 10:1, a amostra com maior tempo de moagem, também obteve maior coercividade. De acordo com os resultados obtidos para caracterização magnética, o aumento da temperatura de sinterização levou a uma diminuição das propriedades magnéticas, como coercividade e remanência e a um aumento na magnetização de saturação.

5.6 Caracterização Dielétrica.

Na caracterização dielétrica das amostras de HFB, os dados foram obtidos diretamente de um analisador de impedância, que nos proporcionou a medição direta dos parâmetros de permissividade relativa e tangente de perdas ($\tan\delta$) na faixa de microondas de 300MHz a 1,0GHz. A figura 5.19 mostra as curvas de permissividade relativa das amostras de HFB, com poderes de moagem de 4:1 e 10:1 em tempos de moagem de 1h e 10h.

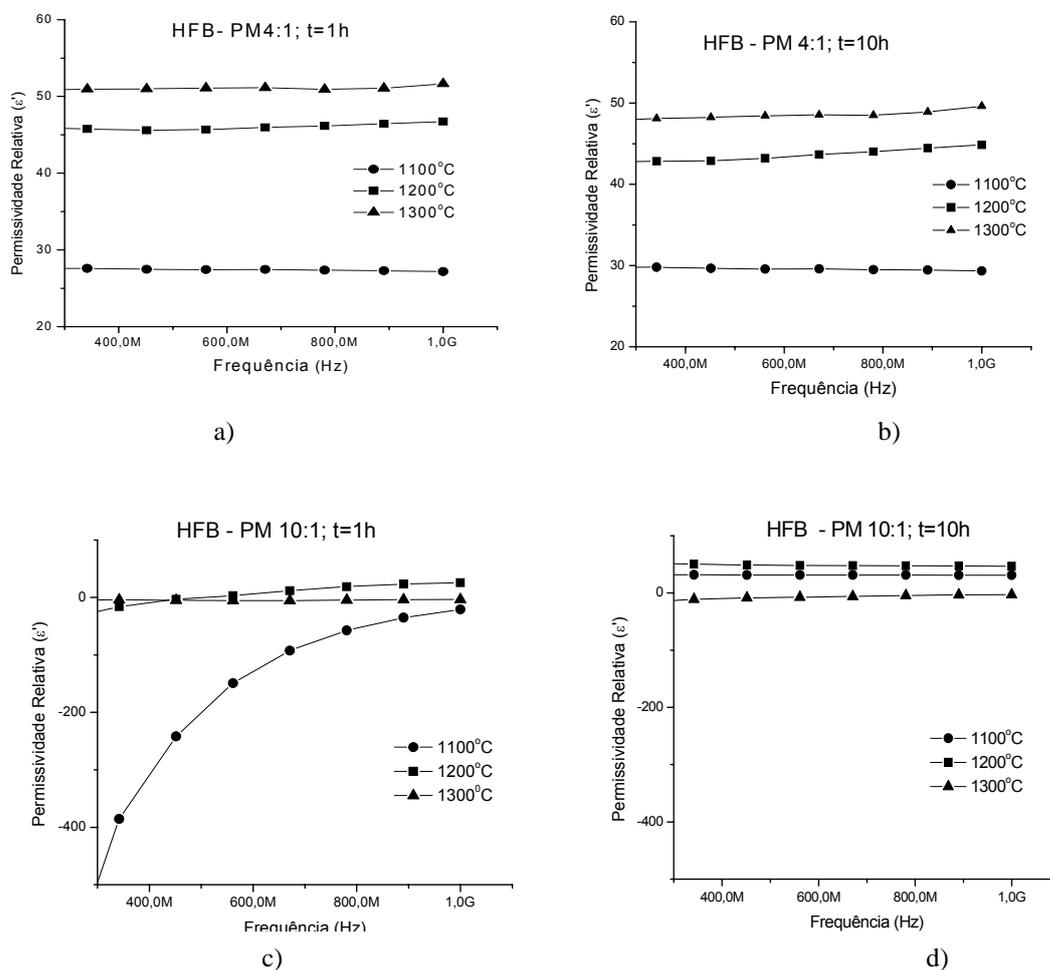


Figura 5.19 Permissividade relativa das amostras de HFB em função da frequência obtida com PM's 4:1 e 10:1, em tempos de 1h e 10h.

Observa-se que para as amostras com poder de moagem de 4:1, há pequena uma variação dos valores de permissividade relativa (ϵ'_r) com relação ao tempo de moagem e à temperatura de sinterização e que para a faixa de microondas, a permissividade relativa tende a manter seus valores constantes. Também que, quanto maior o tempo de moagem, menores são os valores de permissividade relativa das amostras processadas com PM 4:1, nas temperaturas de 1100°C e 1200°C. Quando o processamento é PM 10:1, t=1h, há uma grande variação da permissividade inicial nas baixas frequências, com tendência a ficar constante nas altas frequências. Para 10h, os valores são praticamente constantes. A tabela 5.2 mostra os valores obtidos para a constante dielétrica das amostras de HFB.

Tabela 5.2 Valores de permissividade das amostras de HFB

Amostras HFB	Permissividade 1GHz)
PM 4:1, 1h, 1100°C	27,2
PM 4:1, 1h, 1200°C	46,7
PM 4:1, 1h, 1300°C	51,7
PM 4:1, 10h, 1100°C	29,3
PM 4:1, 10h, 1200°C	44,9
PM 4:1, 10h, 1300°C	49,6
PM 10:1, 1h, 1100°C	-
PM 10:1, 1h, 1200°C	26,0
PM 10:1, 1h, 1300°C	-
PM 10:1, 10h, 1100°C	31,0
PM 10:1, 10h, 1200°C	46,8
PM 10:1, 10h, 1300°C	-

As figura 5.20 e 5.21 mostram as curvas de tangente de perdas ($\tan\delta$) das amostras de HFB processadas com poderes de moagem de 4:1 e 10:1, em tempos de moagem de 1h e 10h, sinterizadas nas temperaturas de 1100°C, 1200°C e 1300°C.

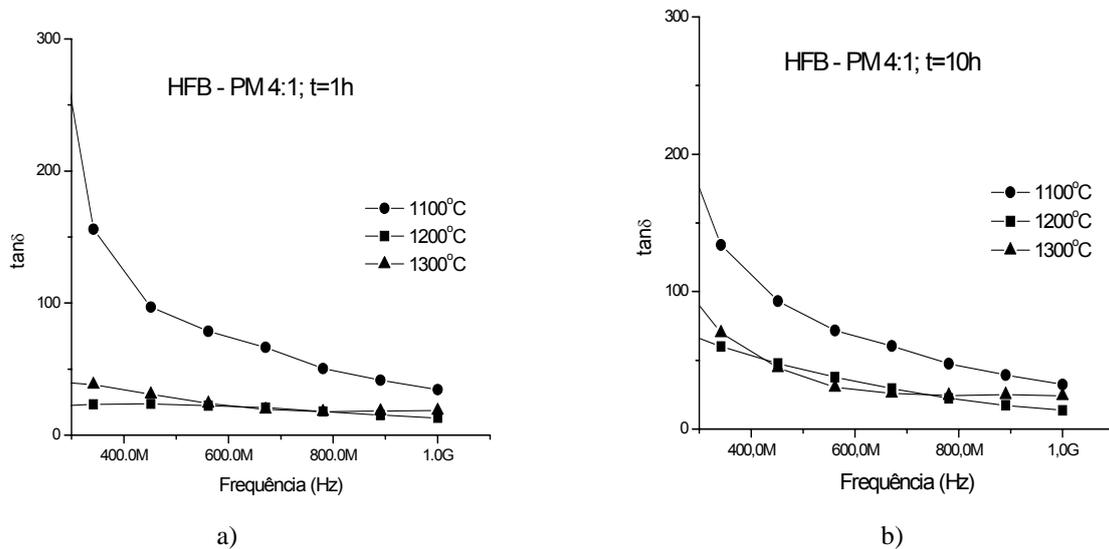


Figura 5.20 Curvas da tangente de perdas em função da frequência das amostras de HFB, processadas com PM 4:1.

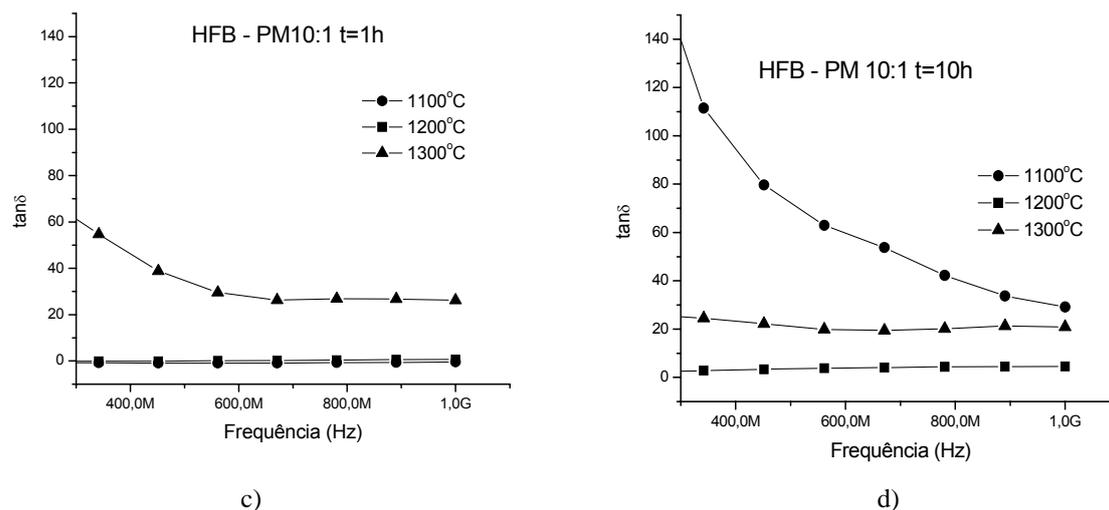


Figura 5.21 Curvas da tangente de perdas em função da frequência das amostras de HFB, processadas com PM 10:1.

Observa-se que a tangente de perdas das amostras variou com as condições de processamento (moagem, tempo e temperatura). Essas variações não tiveram simetria de acordo com o processamento, mas também tiveram uma tendência a se tornarem constantes conforme o aumento de frequência. A tabela 5.3 mostra os valores de $\tan\delta$ obtidos nas amostras de HFB, conforme o processamento utilizado.

Tabela 5.3 Valores da tangente de perdas das amostras de HFB.

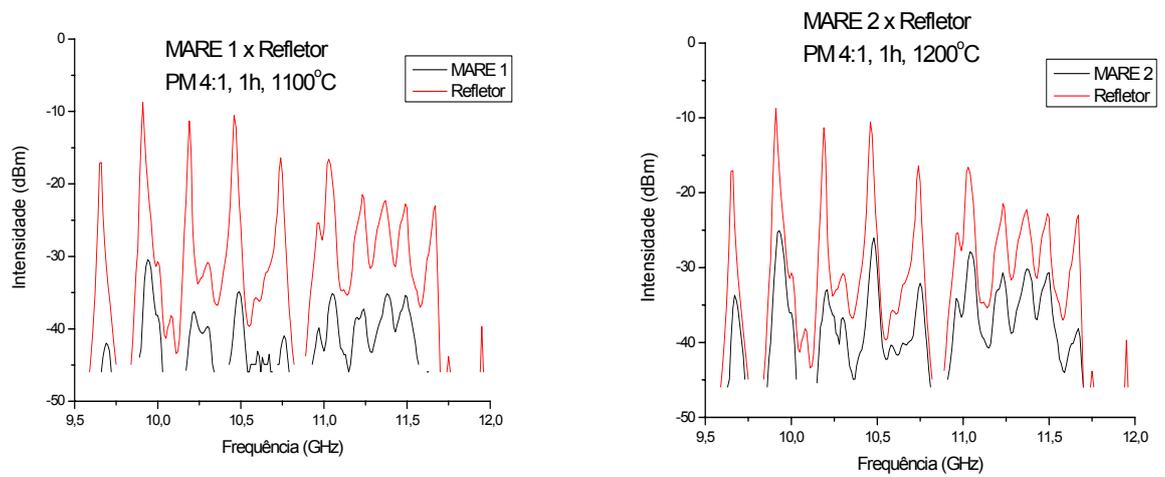
AMOSTRAS DE HFB	$\tan\delta$ (1GHz)
PM 4:1, 1h, 1100°C	34,5
PM 4:1, 1h, 1200°C	13,1
PM 4:1, 1h, 1300°C	18,5
PM 4:1, 10h, 1100°C	32,4
PM 4:1, 10h, 1200°C	13,6
PM 4:1, 10h, 1300°C	24,2
PM 10:1, 1h, 1100°C	-
PM 10:1, 1h, 1200°C	0,65
PM 10:1, 1h, 1300°C	26,2
PM 10:1, 10h, 1100°C	29,1
PM 10:1, 10h, 1200°C	4,6
PM 10:1, 10h, 1300°C	20,9

Observamos que, para a mesma frequência de microondas (1GHz), a $\tan\delta$ variou com o processamento, sendo que ela diminui da temperatura de 1100°C para 1200°C, e depois aumenta novamente da temperatura de 1200°C para 1300°C.

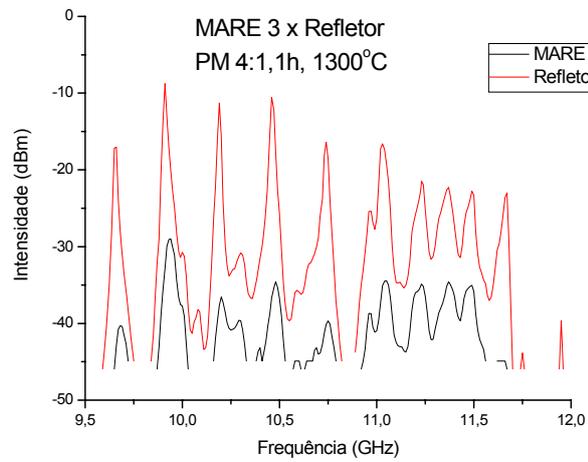
5.7 CARACTERIZAÇÃO DE ABSORÇÃO

A caracterização de um absorvedor pode ser feita diretamente com medidas padronizadas de reflexão no espaço livre ou indiretamente através de medidas das propriedades eletromagnéticas dos materiais constituintes. Para caracterizar as propriedades de absorção, três parâmetros são usados: a largura de faixa de absorção Δf , a faixa de frequência onde a reflexão está com os níveis mais baixos, usualmente -10dB (10% reflexão) ou -20dB (1% reflexão); a frequência de mínima reflexão f_{\min} e o nível de reflexão R_{\min} para f_{\min} . O nível para o qual o MARE é considerado um bom absorvedor de microondas é aquele no qual a perda por reflexão é $RL < -20$ dB.

Os gráficos que mostram a intensidade das reflexões, ou a absorção dos sinais (dBm) versus a frequência (GHz), para as diferentes amostras em função da forma de processamento são ilustrados nas figuras 5.22, 5.23, 5.24 e 5.25, onde temos as curvas de refletividade de um material refletor (referência) e a refletividade das amostras de MARE's, sendo que a diferença de amplitude entre elas indicará o nível de absorção de cada amostra.



b) 1200°C



c) 1300°C

Figura 5.22 Níveis de refletividade dos MARE's e refletor, versus frequência, obtidas no processamento PM 4:1, 1h, nas temperaturas de: a) 1100°C, b) 1200°C c) 1300°C

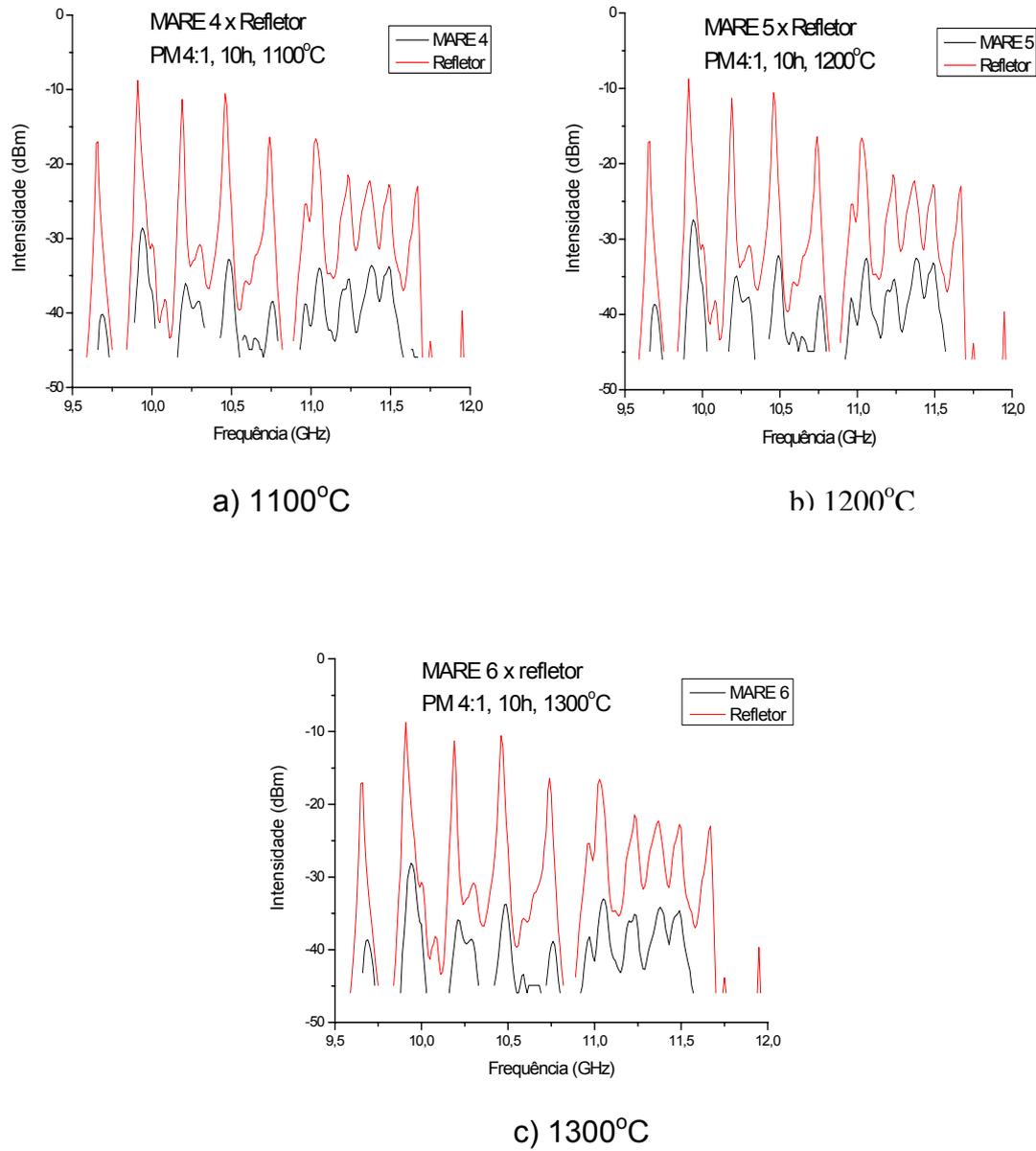


Figura 5.23 Níveis de refletividade dos MARE's e refletor, versus frequência, obtidas no processamento PM 4:1, 10h, nas temperaturas de :
a) 1100°C, b) 1200°C c) 1300°C

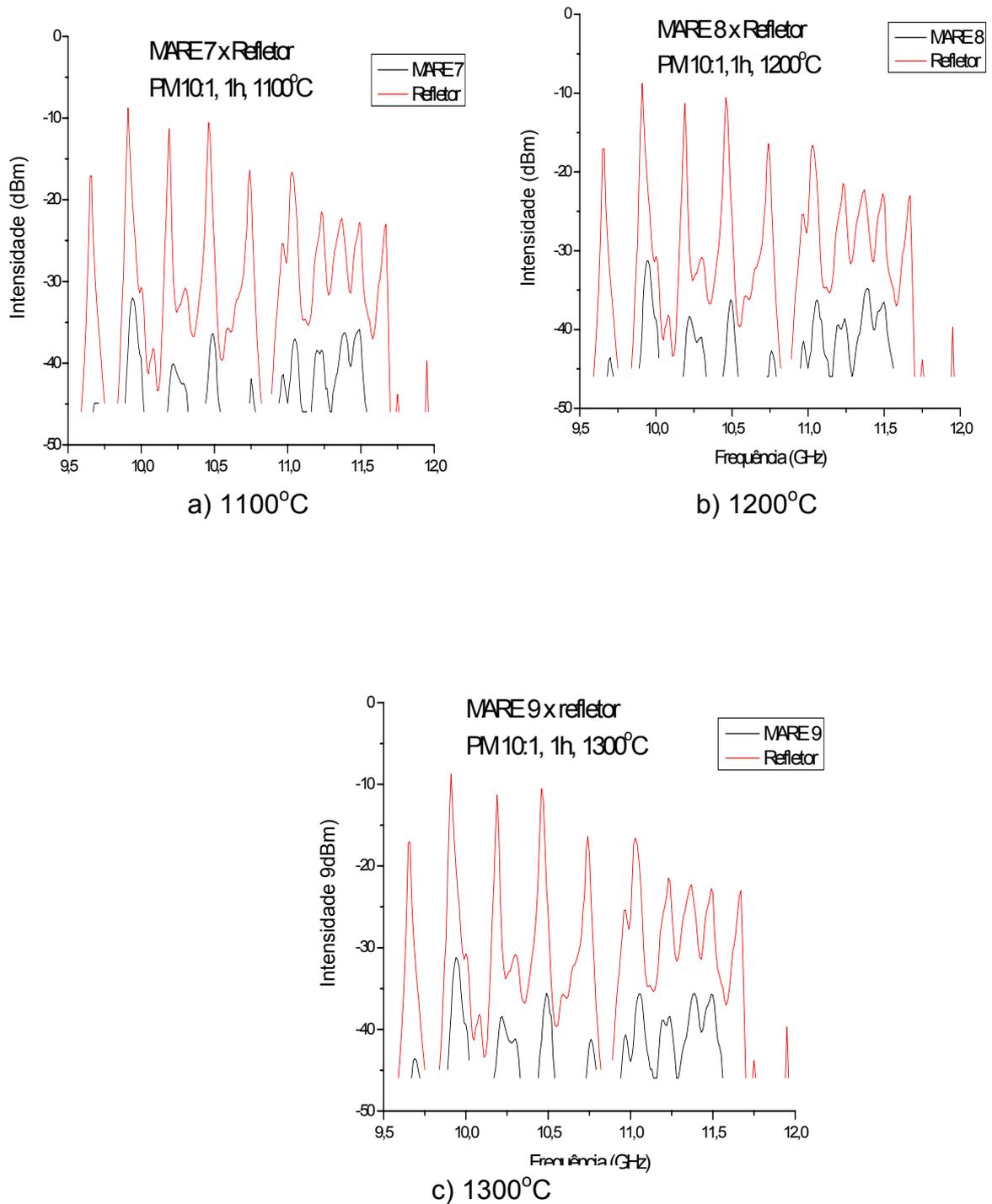


Figura 5.24 Níveis de refletividade dos MARE's e refletor, versus frequência, obtidas no processamento PM 10:1, 1h, nas temperaturas de : a) 1100°C, b) 1200°C c) 1300°C

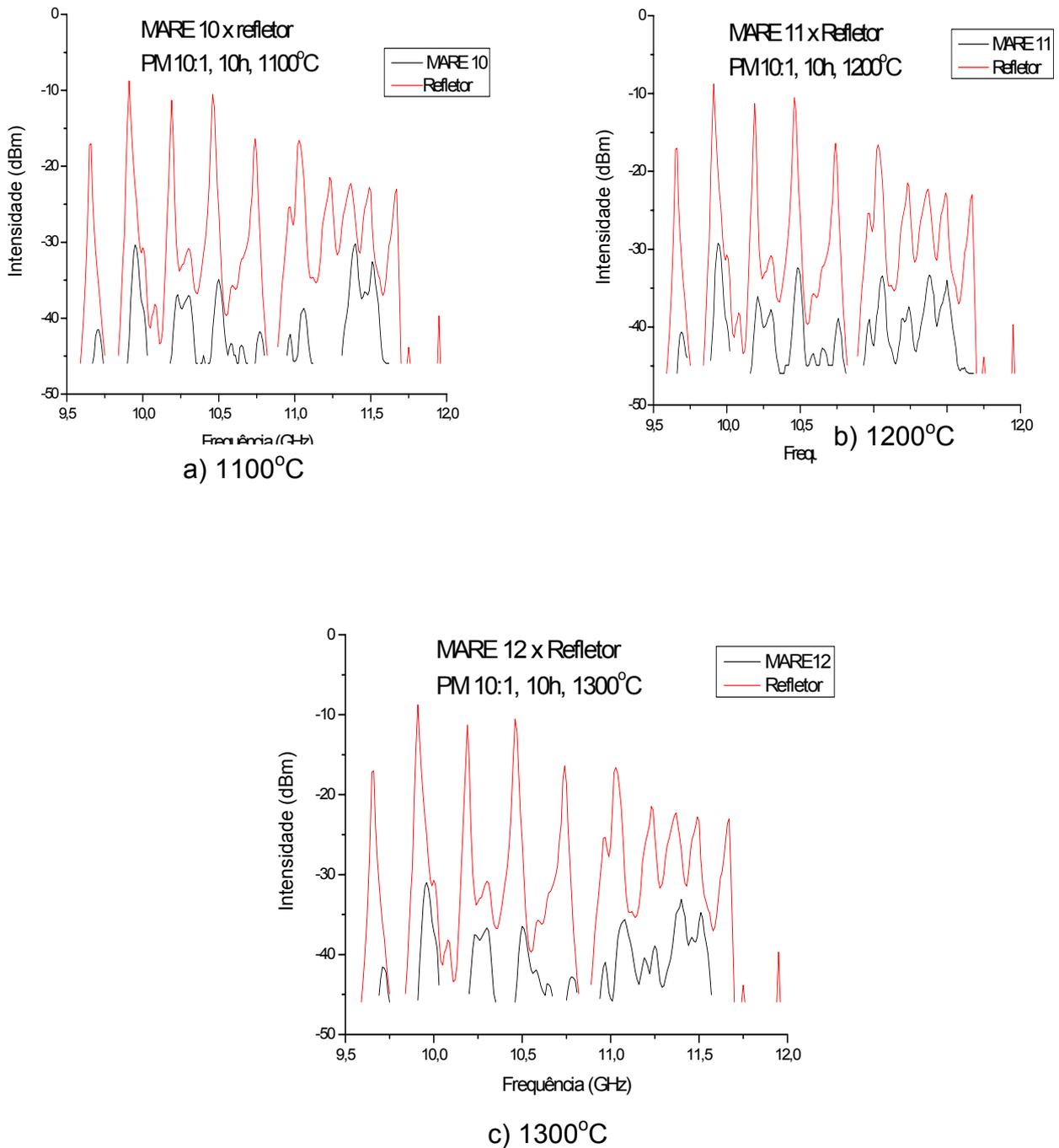


Figura 5.25 Níveis de refletividade dos MARE's e refletor, versus freqüência, obtidas no processamento PM 10:1, 10h, nas temperaturas de :
a) 1100°C, b) 1200°C c) 1300°C

Na figura 5.22, observa-se que a melhor absorção foi obtida pela amostra MARE 1, no processamento PM 4:1, 1h, 1100°C, como pode ser visto na tabela 5.4, que mostra o valor de absorção ou perda por reflexão (Reflection Loss) de 26,29 dB, na frequência de 10,2 GHz. A faixa de frequência onde obtemos perdas de reflexão maiores que 20 dB é de 30MHz e maiores que 10 dB é de 80Mhz. A maior refletividade foi obtida pela amostra MARE 2, que apresenta menor valor de absorção.

Na figura 5.23, obtivemos a melhor absorção na amostra MARE 6, que foi obtida no processamento PM 4:1, 10h, 1300°C. A perda por reflexão (Reflection Loss) de 24,59 dB, na frequência de 10,2 GHz. A faixa de frequência onde obtemos perdas de reflexão maiores que 20 dB é de 30MHz e perdas maiores que 10 dB é de 40Mhz. Observa-se que a variação dos valores de absorção entre as amostras é bem pequena e que, inclusive, em determinada faixa do espectro de frequência, há uma inversão dos níveis de absorção entre as amostras MARE's 4 e 6. Observou-se também que para o PM 4:1, num tempo de moagem de 10h, os MARE's processadas a 1200°C obtiveram a maior refletividade.

Ao elevarmos o poder de moagem para PM 10:1, mostrado na figura 5.24, observou-se que a melhor absorção continuou sendo na faixa de 10,2 GHz, na amostra de MARE 7, que tem a menor temperatura de sinterização, onde a perda por reflexão mínima de 28,67dB, obtendo uma faixa de 30MHz em que a perda por reflexão está acima de 20dB e uma faixa de 60MHz com perda acima de 10dB.

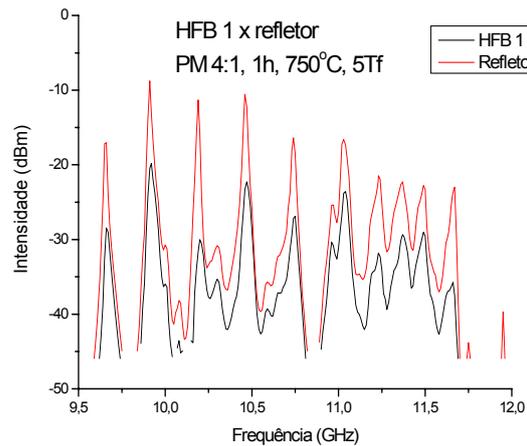
Na figura 5.25, a elevação do tempo de moagem para 10h, observa-se que a melhor absorção também foi obtida na maior temperatura, ou seja, no processamento PM 10:1, 10h, 1300°C. A perda por reflexão é de 26,2dB, na frequência de 10,2 GHz. A faixa de frequência onde obtemos perdas de reflexão inferiores a 20 dB é de 30MHz e perdas de 10 dB é de 40Mhz. Verificou-se, também, que houve uma variação dessa absorção entre os MARE's, conforme a frequência foi aumentada.

Observa-se que as amostras processadas com menor tempo de moagem (1h) obtiveram melhor absorção quando sinterizadas à temperatura mais baixa (1100°C), tendo sido adquirida na frequência de 10,2GHz, sendo que a melhor absorção foi no MARE 7, cujo valor foi de 28,67dB. E que as amostras que foram processadas com maior tempo de moagem (10h) obtiveram melhor absorção quando sinterizadas na maior temperatura (1300°C), sendo que a melhor absorção foi encontrada no MARE 12, cujo valor foi de 26,2 dB. Em todos os modos de processamento, verificou-se que os MARE's que foram sinterizadas a 1200°C obtiveram maior refletividade, ou seja, menor absorção. A tabela abaixo mostra os valores das propriedades de absorção das amostras de MARE's.

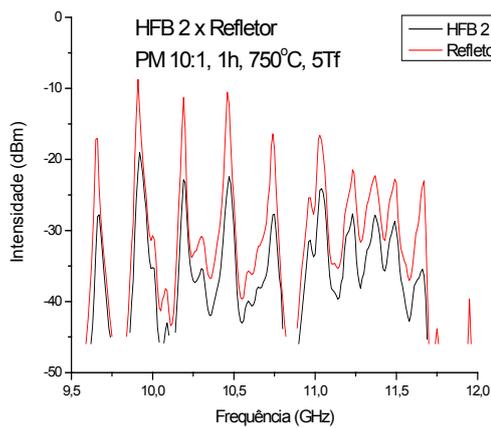
Tabela 5.4 Propriedades de absorção de OEM dos MARE's.

Composição	Propriedades de absorção de OEM dos compósitos			
	Mínimo RL (dB)	Frequência (GHz)	Faixa (MHz) (RL < - 20dB)	Faixa (MHz) (RL < - 10dB)
MARE1 (4,1,11)	26,29	10,2	30	80
MARE 2 (4,1,12)	21,66	10,2	10	80
MARE 3 (4,1,13)	25,27	10,2	30	70
MARE 4 (4,10,11)	24,52	10,2	30	50
MARE 5 (4,10,12)	23,5	10,2	30	60
MARE 6 (4,10,13)	24,59	10,2	30	40
MARE 7 (10,1,11)	28,67	10,2	30	60
MARE 8 (10,1,12)	27,02	10,2	30	50
MARE 9 (10,1,13)	27,3	10,2	30	40
MARE10 (10,10,11)	25,6	10,2	30	50
MARE11 (10,10,12)	24,77	10,2	30	50
MARE12 (10,10,13)	26,2	10,2	30	40

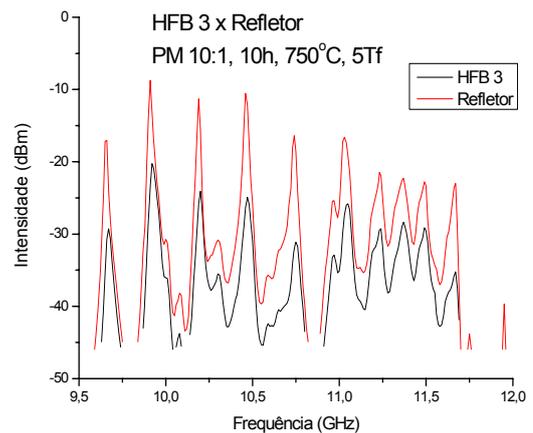
Foram confeccionadas, ainda, três amostras de hexaferrita de bário pura, ou seja, sem misturar com resina, a fim de observar o comportamento dessas amostras com relação à refletividade de ondas eletromagnéticas para a mesma faixa de microondas. Os mesmos procedimentos de testes foram executados e os resultados obtidos são os mostrados na figura 5.26.



a) HFB 1



b) HFB 2



c) HFB3

Figura 5.26 Níveis de refletividade das amostras hexaferrita de bário e refletor versus frequência, conforme o processamento: a) PM 4:1, 1h b) PM 10:1, 1h c) PM 10:1, 10h

Como se pode observar, nas amostras de hexaferrita de bário puras, houve um aumento do nível de refletividade com relação aos MARE's; que o aumento do poder de moagem ocasionou uma diminuição da absorção e que um maior tempo de moagem ocasionou em uma melhor absorção. Vimos ainda que, nessas amostras, a absorção variou com a frequência, ou seja, para cada processamento obtivemos uma frequência diferente para a maior refletividade. A melhor absorção foi adquirida na frequência de 10,2 GHz com um nível de 18,7dB, com uma faixa de frequência de 50MHz onde essa absorção de OEM obteve valores superiores a 10dB. A tabela 5.5, mostra os valores das propriedades de absorção das amostras de HFB sem adição de polímero.

Tabela 5.5 Propriedades de absorção de OEM das amostras de HFB

Composição	Propriedades de absorção de OEM das amostras de HFB			
	Mínimo RL (dB)	Frequência (GHz)	Faixa (MHz) (RL < - 20dB)	Faixa (MHz) (RL < - 10dB)
HFB 1, PM 4:1, 1h	18,7	10,2	-	50
HFB 2, PM 10:1, 1h	11,88	10,46	-	20
HFB 3, PM 10:1, 10h	14,73	10,75	-	60

Estes resultados não podem ser comparados com os dos MARE's, pois as amostras não foram sinterizadas, servindo apenas para conhecimento do comportamento destes materiais em futuros trabalhos.

6 DISCUSSÕES

A moagem de alta energia foi utilizada neste trabalho, com o objetivo de obter uma mistura mais homogênea dos materiais de partida antes da calcinação e a diminuição de partículas antes da sinterização. A MAE promove o aumento da reatividade entre as partículas sólidas devido à desordem estrutural e os defeitos cristalinos que favorecem a difusão e rearranjo atômico, aumentando a velocidade de sinterização e diminuindo a temperatura de sinterização. A MAE foi realizada por um moinho planetário, que não promoveu nenhuma reação ou transformação dos materiais de partida BaCO_3 e Fe_2O_3 em hexaferrita de bário $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ durante a mistura e, após a calcinação, os tempos de moagem de 1h e 10h não foram suficientes para produzir impurezas adicionais de ferro devido ao desgaste pelo choque entre as esferas e o vaso no material, que poderia ocasionar a formação de fase indesejada ou fora da estequiometria, conforme mostram as figuras 5.1 e 5.2. Nos difratogramas das figuras 5.3-5.6, observa-se que o aumento de temperatura para um mesmo tempo de moagem produz um aumento das intensidades das reflexões basais, o que indica um aumento do tamanho de grãos e densidade. E ainda, que o aumento do tempo de moagem produz reflexões mais amplas e menos intensas. Isto porque o aumento do tempo de moagem modifica a estrutura do material, diminuindo o tamanho do cristalito.

As amostras que apresentaram maior densidade aparente foram as de maior área superficial específica, menor aglomeração e maior temperatura de sinterização. A área superficial específica determina o tamanho dos aglomerados que se formam por causa da alta energia superficial das partículas. As amostras processadas com menor poder de moagem (4:1) e maior tempo de moagem (10) obtiveram maiores áreas superficiais específicas, conforme mostra a figura 5.7. A evolução da porosidade está relacionada com a densidade aparente, ou seja, o aumento da temperatura tende a aumentar a densidade do material, reduzindo assim a sua porosidade e vice-versa. A maioria das amostras apresentou este comportamento, com exceção da amostra obtida com processamento PM 10:1, 1h, 1300°C, que obteve um

aumento da porosidade quando da elevação da temperatura de sinterização de 1200°C para 1300°C, que pode ter ocorrido, devido ao crescimento não uniforme dos grãos. As maiores densidades foram obtidas a 1300°C e à medida que o poder de moagem aumentou a densificação também aumentou. Observou-se também uma inversão de valores da densidade, conforme o tipo de processamento, ou seja, para PM 4:1, as amostras processadas com tempo de moagem de 1h, tiveram seus valores de densidade inferiores aos de 10h. Quando o poder de moagem aumentou PM 10:1, as amostras processadas com menor tempo de moagem tiveram maiores densidades que as de 10h.

A morfologia das partículas ou grãos, o tamanho de partículas ou grãos, a porosidade e a homogeneidade são fatores microestruturais que afetam fortemente as propriedades das hexaferritas. A microestrutura pode ser influenciada pelo processamento e temperatura de sinterização e as micrografias mostraram a distribuição e tamanho de grãos, onde se observou o crescimento anormal de grãos a partir da temperatura de 1200°C, tendo sido observados grãos grandes e pequenos também nas microestruturas sinterizadas à temperatura de 1300°C,

Na caracterização magnética, observam-se mudanças nas propriedades magnéticas das amostras com a elevação da temperatura de sinterização, pois o loop de histerese fica mais estreito à medida que a temperatura aumenta, para qualquer que seja o tipo de processamento, ocasionando diminuição da coercividade (H_c) e remanência (H_r) e aumento da magnetização de saturação (B_s). A caracterização dielétrica pelas medidas de permissividade e tangente de perdas serviu apenas para termos uma noção do comportamento do material para com estes parâmetros com o aumento da frequência, não sendo utilizado nas análises, devido à limitação da faixa de frequência utilizada na medição (1GHz) e a faixa de frequência de aplicação dos MARE's (9,5 a 12GHz).

Na caracterização por absorção, observa-se que as maiores perdas por absorção ocorreram para o menor tempo de moagem e menor temperatura de sinterização nos dois poderes de moagem PM 4:1 e PM 10:1, sendo que a maior absorção ocorreu para o maior PM. Quando elevamos a temperatura

para 1200°C, observa-se uma redução da absorção em todas as amostras e principalmente na amostra MARE1, onde a refletividade foi a maior, podendo ter ocorrido devido a uma mistura não homogênea entre o pó de ferrita e o polímero. Nesta temperatura, todas as amostras obtiveram as maiores refletividades para os diversos tipos de processamento e também os maiores valores de magnetização de saturação e, ainda, observa-se a ocorrência de um aumento da densidade aparente e diminuição da porosidade; mas há uma diminuição da coercividade e remanência, o que leva a diminuição da área do loop de histerese em relação ao processamento com temperatura de 1100°C e, conseqüentemente, a uma diminuição das perdas por absorção, ou seja, a um aumento na refletividade das amostras.

Quando a temperatura foi elevada para 1300°C, observou-se uma elevação nos valores de perdas por absorção das amostras, sendo que as amostras processadas com maior poder de moagem PM 10:1 obtiveram as maiores absorções. Nesta temperatura, a área de loop de histerese diminuiu mais ainda, aparentando o comportamento das ferritas magneticamente moles, ou seja, de baixas perdas. Ocorre que com o aumento da temperatura, a densidade das amostras aumentou, o que facilitou o movimento de spins e reduziu o número de poros, o qual é favorável ao movimento das paredes de domínios. O aumento de temperatura ocasionou também o aumento do tamanho de grãos, que possui menores áreas de contorno de grãos por unidade de volume. Sabe-se que a magnetização é aumentada pela facilidade de deslocamento das paredes dos domínios na direção do campo magnético aplicado. A permeabilidade magnética está relacionada com a facilidade dos movimentos das paredes dos domínios magnéticos, ou seja, elas crescem linearmente com o aumento do tamanho de grãos. Portanto, o aumento da permeabilidade, pelo aumento do tamanho de grãos, ocasionou o aumento da absorção das amostras de HFB para essa temperatura. Deve-se tomar cuidado com o uso indiscriminado do aumento do tamanho de grãos para aumentar a permeabilidade magnética, pois este aumento pode conduzir à produção de ferritas inferiores do ponto de vista mecânico, elétrico e até mesmo magnético, porque com o aumento de tamanho de grão podem surgir imperfeições como

poros, rachaduras, inclusões, reduzindo as suas resistências mecânica, elétrica e a permeabilidade pelo impedimento do movimento das paredes [59].

A maior absorção de ondas eletromagnéticas aconteceu com a amostra MARE7, processada com maior poder de moagem (PM 10:1), menor tempo de moagem (1h), e na menor temperatura (1100^oC). Nela foi observada a menor coercividade dentre as amostras obtidas nessa temperatura, uma alta densidade aparente e baixa porosidade. Para esta temperatura, pode-se ver que a menor absorção ocorreu na amostra MARE 4, que foi processada com menor poder de moagem (PM 4:1), maior tempo de moagem (10h) e onde foi encontrada a maior porosidade, ou seja, parâmetros inversos.

Com relação às amostras de hexaferrita de bário processadas sem adição do polímero, pelas análises, era esperado que o melhor resultado de absorção ocorresse para o processamento PM 4:1, 10h, pois a tendência seria um aumento da absorção para o aumento do tempo de moagem, como pode ser visto no processamento PM 10:1. Observa-se também que há uma inversão no comportamento das amostras para com relação aos MARE's, ou seja, quanto maior poder de moagem, menor será a absorção e para um maior tempo de moagem, maior será a absorção. Os resultados das análises de absorção das amostras de HFB puras, não servem como comparativo com as amostras de MARE's, pois são materiais diferentes, com processamentos diferentes, mas servem de indicativo para um novo trabalho.

Finalmente, apresenta-se a seguir um resumo dos diversos MARE's estudados por diferentes autores, enfatizando os respectivos métodos de caracterização e as medidas de máxima absorção obtidas para fins de comparação com os resultados obtidos para a HFB estudada neste trabalho:

- os MARE's de ferritas de Mg-Mn obtidos por Migliano [31] e caracterizados pelo método NRL obtiveram a máxima absorção em torno de 15 dB na faixa de 8,5GHz a 9,5 GHz;
- os MARE's dielétricos (polianilina) e magnéticos (MnZn, NiZn e MgZn) fabricados por Resende [32] e caracterizados pelo método RCS obtiveram na faixa de 8 a 12 GHz, como máximas absorções, 13dB e 17dB, respectivamente;

- os MARE's de HFB dopadas com Co e Ti, processados por Meshran [6] e caracterizados pelo método ATD, obtiveram absorção máxima em torno de 24dB na faixa de 8,8GHz a 11,8GHz;
- os MARE's feitos com ferritas Mn-Zn estudados por Freitas [33] e caracterizados pelo método de reflectometria em guia de ondas obtiveram máxima absorção em torno de 10dB na faixa de 8 a 12 GHz;
- os MARE's de HFB dopados com Co e Ti preparados por Sugimoto [34], e caracterizados teoricamente, obtiveram máxima absorção, em torno de 20dB entre 0,65GHz e 1 GHz;
- os MARE's a base de ferritas S/M e Z/M, realizados por Bregar [35] e caracterizados teoricamente, apresentaram até 30 dB de absorção em uma amostra de 5,5mm de espessura;
- os MARE's de HFB dopada com Titânio obtidos por Jianxun [36] e caracterizados teoricamente na faixa de 5GHz a 15GHz, apresentaram até 40dB de absorção máxima;

Entretanto, os MARE's de HFB estudados no presente trabalho, processados pelo método de MAE e sem adição de dopantes, foram caracterizados pelo método de reflectometria em guia de ondas e apresentaram perdas superiores a 20dB, em determinadas faixas do espectro de 9,5GHz a 12GHz, tendo obtido uma máxima absorção de 28,67dB. Este fato demonstra a importância e potencial de aplicação da HFB, como absorvedores de microondas.

7 CONCLUSÃO

O processamento da hexaferrita de bário por moagem de alta energia demonstrou ser um método bastante proveitoso e flexível, visto que, além de fácil manuseio, vários parâmetros das condições de processamento puderam ser manipulados, a fim de que pudéssemos obter microestruturas com boas propriedades magnéticas, essenciais à produção de materiais absorvedores de radiação eletromagnética. A moagem de alta energia dos materiais de partida BaCO_3 e Fe_2O_3 possibilitou uma mistura homogênea e obtenção de fase hexaferrita de bário a partir de 1100°C , sendo que o controle da temperatura, o poder de moagem e tempo de moagem refletiram na microestrutura das amostras obtidas e, conseqüentemente, nas propriedades magnéticas utilizadas para verificar o comportamento das amostras com relação à capacidade de absorção das ondas eletromagnéticas. A elevação da temperatura de sinterização foi vital na observação da variação das propriedades da HFB, como: o aumento da densificação das amostras, crescimento de grãos, aumento da magnetização, diminuição da coercividade e remanência, diminuição da área de loop de histerese, que influenciam diretamente na capacidade de absorção das ondas eletromagnéticas.

A metodologia de caracterização de materiais absorvedores de radiação eletromagnética por reflectometria em guia de ondas demonstrou ser um método bastante eficiente, visto que os materiais constituintes são de alta precisão mecânica, baixas perdas e permitem a observação do comportamento das amostras em uma larga faixa do espectro de frequência. Os resultados mostraram que a hexaferrita de bário é um bom absorvedor de radiação eletromagnética, em que se obtiveram perdas por absorção de até 28,67dB na frequência de 10,2 GHz em uma faixa de frequência de aproximadamente 30MHz. Entretanto, estes valores poderão ser elevados, pois um dos problemas no campo da absorção de ondas eletromagnéticas é que o material pode absorver energia somente numa faixa estreita do espectro, mas se vários tipos de ferritas de bário com diferentes frequências de ressonância são

combinadas para uma estrutura multicamadas, é possível absorver ondas eletromagnéticas numa larga faixa de microondas.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Finalmente, como sugestão de temas de estudo e pesquisa que possam complementar este trabalho, podemos citar:

1. Promover a caracterização de MARE's à base de HFB, por outros métodos de processamento e caracterização de absorção, com ou sem adição de dopantes
2. Promover a caracterização de MARE's para outros tipos de ferritas, como por exemplo, o estrôncio.
3. Desenvolver e caracterizar MARE's com outros tipos de polímeros.
4. Desenvolver métodos para caracterização de MARE's multicamadas.
5. Promover caracterização de MARE's em outras faixas do espectro de frequências para as mais diversas aplicações.
6. Desenvolver e caracterizar MARE's para aplicações como filmes finos.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. M.R. MESHRAM, N.L. AGRAWAL, B. M. SINHA. “Transmission Line Modeling (TLM) for Evaluation of Absorption in Ferrite Based Multi Layer Microwave Absorber”. IEEE, 2003.
2. Y. NIE, H.H. HE, Z.K. FENG, X.C. ZHANG e X.M. CHENG. “Microwave Characterization of (Co,Zn)₂W Barium Hexagonal Ferrite Particles”. Journal of Magnetism and Materials Magnetism, 303 (2006), 423 – 427.
3. J.C. DIAS, I.M. MARTINS, E.L. NOHARA, M.C.RESENDE. “Refletividade de Fótons Microondas por Tintas Poliuretânicas Aditadas com Ferritas de NiZn e MnZn”. Revista de Física Aplicada e Instrumental, 18, 2005, 24-33.
4. V.I SILVA, A.P.A. DINIZ, P.T.A. SANTOS, D.A. VIEIRA, A.C.F.M. COSTA, D.R. CORNEJO e L. GAMA. “Avaliação das Características Morfológicas e Magnéticas de Pós de Ferritas Ni-Zn Dopadas com Cromo”, Revista Eletrônica de Materiais e Processos, V 1, 2(2006), 07–17.
5. J. QIU, Q. ZHANG, M. GU E H. SHEN. “Effect of Aluminium Substitution on Microwave Absorption Properties of Barium Hexaferrite”. Journal of Applied Physics, 98, 103905, 2005.
6. G. MU, H. SHEN, J. QIU, M. GU. “Microwave Absorption Properties of Composite Powders with Low Density”. Applied Surface Science, 253(4), 2006, 2278-2281.
7. M. PARDAVI–HOVARTH. “Microwave Applications of Soft Ferrites”. Journal of magnetism and Magnetic Materials, 215-216, 2000, 171-183.
8. C. WANG, XIWEI QI, LONGTU LI, JI ZHOU, X. WANG, ZHENNING YUE. “High-Frequency Magnetic Properties of Low-Temperature Sintered Co-Ti Substituted Barium Ferrites”. Materials Science and Engineering, B99, 2003, 270-273.
9. R.M.C.V. REIS, A.C.F.M. COSTA, M.R. MORELLI e R.G.H.A. KIMINAMI. “Ferritas Ni-Zn: Efeito do Tempo de Sinterização na Microestrutura e Propriedades Magnéticas”. Anais 48^o Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2004, São José dos Campos- São Paulo.

10. S.M. GHENO, R.R. CORREA e P.I. PAULIN FILHO. “Domínios magnéticos em hexaferrita de bário magnetizadas progressivamente”. DEMA-UFSCAR – São Carlos, São Paulo.
11. R. R. CORREA. “Caracterização Elétrica, Dielétrica e Magnética da Hexaferrita de Bário obtida pela Moagem de Alta Energia”. Tese de Doutorado, UFSCAR, S. Paulo, 2005.
12. C.R. JOSIANE, FABIO S.S., C.R. MIRABEL e M.M. INACIO. “Absorvedores de Radiação Eletromagnética Aplicados ao Setor Aeronáutico”. Revista Ciência e Tecnologia, 15, 2000, 32 – 42.
13. JACK T. GEAR. “Microwave Absorbers Manage Military Electronics RF Interference”. Defense electronics, 2004, 6-9.
14. R.C. LIMA, J.C.S. LEANDRO, e T. OGASAWARA. “Síntese e Caracterização da Hexaferrita de Bário Tipo M Dopada com Lantânio e Sódio para Utilização como Absorvedor de Microondas”. Cerâmica, 49, 2003, 44-47.
15. M.S.PINHO, R.C. LIMA, J.C.SANTOS, A.C.C. PERES, M.R.SILVA, J.M. NETO. “Avaliação do Efeito de Diferentes Dopantes Sobre a Histeresimetria Magnética dos Compósitos de Hexaferritas de Bário Dopadas: Policloroprene Utilizadas como RAM's”. Revista Marítima Brasileira, 16 (2003). Disponível em www.en.mar.mil.br. Acessado ...
16. FRANCHITTO, M. “Caracterização Eletromagnética de Materiais Absorvedores”. Dissertação de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos – S.Paulo, 2001.
17. P. SINGH, V.K. BARBAR, A. RAZDAN, S.L. SRIVASTAVA e K. PURI. “Complex Permeability and Permeattivity and Microwave Absorption Studies of $\text{Ca}(\text{CoTi})_x\text{Fe}_{12-2x}\text{O}_{19}$ Hexaferrite Composites in X Band Microwave Frequencies”. Materials Science and Engeneering. B67, 1991, 132-138.
18. P.SINGH. V. BABBAR, A. RAZDAN, S.L.SRIVASTAVA e T.L. GOEL. “Microwave Absorption Studies of Ca-NiTi Hexaferrite Composites in X band”. Materials Science and Engeneering, B78, 2000, 70-74.

19. R.C. LIMA, M.S.PINHO, M.L.GREGORI, R.C.R. NUNES, T, OGASAWARA. "Effect of Double Substituted M-Barium Hexaferrites on Microwave Absorption Properties". *Materials Science-Poland*, 22, 3, 2004, 245-252.
20. J.Y. SHIN e J.H. OH. "The Microwave Absorbing Phenomena of Ferrite Microwave Absorbers". *IEEE, Transactions on Magnetic*, 29, 1993, 6.
21. T. KAGOTANI, D. FUGIWARA, S. SUGIMOTO e K. INOMATA. "Enhancement of GHz Eletromagnetic Wave Absortion Characteristics in Aligned M-type Barium Ferrite $Ba_{1-x}La_xZn_yFe_{12-x-y}(Me_{0,5}Mn_{0,5})_yO_{19}$ ($x = 0,0 - 0,5$); ($y = 1,0 - 3,0$; Me: Zr, Sn)". *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 272-276, 2004, 1813-1815.
22. M.S. PINHO, J.C.S. LEANDRO, M.L. GREGORI E R.C.A. NUNES. "Avaliação do Efeito da Adição de Manganês sobre as Medidas de Refletividade por Guia de Ondas de Hexaferrita de Bário". *Anais Congresso de Engenharia e Ciência dos materiais*, 14, 2000, S. Pedro – SP.
23. X. TANG, B.Y. ZHAO, Q. TIAN, K.A. HU. "Sinthesis, Characterization and Microwave Absorption Properties of Titania Coated Barium Ferrite Composites". *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 67(12), 2006, 2442 – 2447.
24. A. GHASEMI, A. HOSSIENPOUR, A. MORISAKO, A. SAATCHI, M. SALEHI. "Eletromagnetic Properties and Microwave Absorbing Characteristics of Doped Barium Hexaferrite". *Journal de Magnetism and Magnetic Materials*, 302, 2006, 429-435.
25. S.S. KIM, S.B. JO, K.I. GUEON, K.K. CHEI, J.M. KIM e K.S. CHURN. "Complex Permeability and Permittivity and Microwave Absorption of Ferrite-Rubber Composite in X Band frequencies", *IEEE, Transactions on Magnetics*, 27, 1991, 6.
26. Z. HAIJUN, W. MINGEHONG, Y. XI, Z. LIANGUING. "Complex Permittivity, Permeability and Microwave Absorption of Barium Ferrite by Citrate Sol-Gel Process". *Rare Metals*, 22, 2, 2003, 125.

27. M.S. PINHO, M.L. GREGORI, R.C.R. NUNES E B.G. SOARES. "Performance of Radar Absorbing Materials by Waveguide Measurements for X and Ku Band Frequencies". *European Polimery Journal*, 38, 2002, 2321-2327.
28. E.L. NOHARA. "Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética (8 – 12GHz) obtidos pela Combinação de Compósitos Avançados Dielétricos e Revestimentos Magnéticos". Tese Doutorado, ITA, São José dos Campos, São Paulo, 1998.
29. M.S. PINHO, V.R. CAFFARENA, R.C. LIMA. "Microwave Absorption of Substituted M-Type Barium Hexaferrite Nanopowders in Polichloroprene Matrices". 2nd Mercosur Congress of Chemical Engeneering, EMPROMER.
30. A.C.C. MIGLIANO, C.A.R. FREITAS e J.F. SIQUIERA. "Características de Absorção da Radiação Eletromagnética em Revestimentos Planos a Base de Ferritas Mg-Zn", *Revista Científica Periódicos – Telecomunicações*, São José dos Campos – São Paulo, 5, 2, 2002.
31. M.C. RESENDE, J.M. MARTINS, M.A.J. MIACCI, E.L. NOHARA. "Radar Cross Section Measurements (8 - 12GHz) of Magnetic and Dielectric Microwave Absorbing Thin Sheets". *Revista de Física Aplicada e Instrumentação*, 15, 1, 2002.
32. M. R. MESHARAM, N. K. AGRAWAT, B. SINHA e P. S. MISRA. "Characterization of M-Type Barium Hexaferrite based Wide Band Microwave Absorber". *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 271, 2004, 207-214.
33. C.A.R. FREITAS, A.C.C. MIGLIANO e J.F. SIQUIERA. "Caracterização do Nível de Absorção da Radiação em Revestimentos Planos à Base de Ferritas Eletromagnéticas Mn-Zn Medidas por Guias de Ondas na Faixa de 8 – 12GHz". *Anais 48^o Congresso Brasileiro de Cerâmica*, 2004, Curitiba – PR..
34. S. SUGIMOTO, K. HAGA, T. KAGOTAMI e K. INOMATA. "Microwave Absorption Properties of Ba M-Type Ferrite Prepared by Modified Coprecipitation Method". *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 290-291, 2004, 1188-1199.

35. V.B. BREGGAR, D. LISJAK e M. DROFENIK. "Development and Characterization of Eletromagnetic Absorber". *Materials and Technology*, 39, 2005, 3.
36. J. QIU, L. LAN, H. ZHANG e M. GU. "Microwave Absorption Properties of Nanocomposites Films of BaFe₁₂O₁₉ and TiO₂ Prepared by Sol-Gel Method". *Materials Science and Engineering*, B133, 2006, 191-194.
37. J. QIU, M. GU e H. SHEN. "Microwave Absorption Properties of Al-and-Cr, Substituted M-Type Barium Hexaferrite". *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 295, 2005, 263-268.
38. W.D. CALLISTER Jr. "Ciência e Engenharia de Materiais – Uma introdução, LTC, 5ª edição, 2002.
39. G.J.B. RODRIGUEZ. "O Porquê de Estudarmos os Materiais Magnéticos". *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 20, 4, 1998.
40. D.R. ASKELAND. "The Science and Engineering of Materials", PWS Publishing Company, Boston, 1994.
41. W.F. SMITH. "Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais". 3ª edição, McGraw-Hill, 1998.
42. G.A.P. RIBEIRO. "As Propriedades Magnéticas da Matéria: Um Primeiro Contato". *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 22, 3, 2000.
43. P.A. TIPLER. "Física para Cientistas e Engenheiros – Eletricidade, Magnetismo e Ótica", LTC, 2, 2000.
44. G. SILVA, O. BARRADAS. "Telecomunicações – Sistemas de Radiovisibilidade", LTC, 2, 1983.
45. J. PINES, O. BARRADAS. "Telecomunicações, Sistemas de Multiplex", LTC, Embratel, 1977.
46. D. TALEY. "Telefonia em Altas Frequências". BTFB, 222p, 1979.
47. R.M. CARVALHO. "Princípios de Comunicações". 5ª edição, editado pelo autor, Vitória/ES, 2006.
48. ARTUZI. "Curso de Modulação AM". Departamento Engenharia Elétrica – UFPR. Disponível www.eletr.ufpr.br/artuzi. Acessado ...
49. JOHN KUT. "Microwave and waveguide – Characteristics of Propagation". *Microwave and Waveguides*, 1990.

50. K. OLIVEIRA. "Apostila de Área de Microondas – Antenas e Microondas". 08/2005.
51. V. VALKENBURGH, NOOGER e NEVILLE. "Radar Básico", v 1, LFB, 1968.
52. C.R. MIRABEL, E.L. NOHARA e M.A.S. MIACCI. "Medidas de Refletividade de Radiação Eletromagnética Usando as Técnicas CRS e NRL". Revista Física Aplicada e Instrumentação, 16, 1, 2003, 30-36.
53. A.M. GAMA e F.S.G. LANDGRAL. "Temperatura de Curie e o Parâmetro de Rede das Ferritas Mn-zn com Diferentes Teores de Óxido de Ferro". Anais 48º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2004, Curitiba, PR.
54. J.S. REED. "Principles of Ceramic Processing". 2nd edition, John Wiley & Sons, 1995.
55. R.H.G.A. KIMINAMI. "Apostila do Curso de Especialização em Engenharia de Materiais – Processamento de Materiais Cerâmicos". UFSCAR / CEFET-MA, 1992.
56. C.V. SANTILLI, S.H. PULCINELLI. "Análise da Textura de Materiais Cerâmicos a partir das Isotermas de Adsorção de Gases". Cerâmica 39, 259, 1993.
57. R.V. DECAREAU e R.A. PETERSON." Microwave processing and Engineerind". Ellis Worwood; Chichester, England, 1986.
58. W.D. KINGERY, H.K. BOWEN, D.R. UHLMANN. "Introduction to Ceramics". 2nd edition , John Wiley & Sons, 1976.
59. J.C.S. SOTTOMAIOR e L.F. SANTOS. "Cerâmica Magnética: Ferrites e Ferrimagnetismo". Disponível em www.eletrica.ufpr.br/piazza/materiais/julio&laurindo.pdf. Acessado ...

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)