

Roberto Simões

**MATERIAIS ABSORVEDORES DE
RADIÇÃO ELETROMAGNÉTICA NA
FAIXA DE 8 A 12 GHz**

Taubaté – SP

2005

Roberto Simões

**MATERIAIS ABSORVEDORES DE
RADIÇÃO ELETROMAGNÉTICA NA
FAIXA DE 8 A 12 GHz**

Dissertação apresentada para obtenção do Título de Mestre pelo Curso de Engenharia Mecânica do Departamento de Materiais da Universidade de Taubaté,

Área de Concentração: Tecnologia de Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Evandro Luis Nohara

Taubaté – SP

2005

Roberto Simões

**MATERIAIS ABSORVEDORES DE RADIAÇÃO
ELETROMAGNÉTICA NA FAIXA DE 8 A 12 GHz**

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ, TAUBATÉ, SP

Data: _____

Resultado: _____

COMISSÃO JULGADORA

Prof^a. Dr^a. Mirabel Cerqueira Rezende – Depto. de Eng. Mecânica – Unitau – Taubaté.

Assinatura _____

Prof^a. Dr^a. Cristina Moniz Araujo Lopes – Centro Técnico Aeroespacial – Instituto de Aeronáutica e Espaço - Divisão de Materiais – São José dos Campos.

Assinatura _____

Prof. Dr. Evandro Luís Nohara – Depto. De Eng. Mecânica – Unitau – Taubaté.

Assinatura _____

Dedico este trabalho a Noely, minha amada esposa, companheira, amiga e parceira de todas as horas. Sem sua compreensão este trabalho jamais teria sido executado.

A :: G :: D :: G :: A :: D :: U ::
(que detêm a Força, a Beleza e a Sabedoria)

Aos meus amados filhos Guilherme e Gabriel, que lhes sirva de boa semente em campo fértil, num mundo cheio de ervas daninhas.

Aos meus pais José Simões e Thereza Lopes Simões (in memorian), pelo campo fértil.

À Universidade de Taubaté pela oportunidade da realização do Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica.

Ao Centro Técnico Aeroespacial (CTA) e à Divisão de Materiais (AMR) do Instituto de Aeronáutica e Espaço, por disponibilizar sua infra-estrutura para a realização da parte experimental deste trabalho.

Aos técnicos e estagiários da Divisão de Materiais, pelo suporte técnico para a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Wilton Ney do Amaral Pereira, meu amigo, pelos conselhos gratuitos que sempre me acompanharam no decorrer da confecção desta dissertação.

Ao meu orientador e amigo, Prof. Dr. Evandro Luís Nohara, pela direção apontada e pelos ensinamentos, que não foram poucos.

A todos os meus amigos, que são muitos e não cito nominalmente para não esquecer de nenhum, que sempre me incentivaram na continuidade de minha vida acadêmica e profissional.

RESUMO

SIMÕES, Roberto. **Materiais absorvedores de radiação eletromagnética na faixa de 8 a 12 GHz**. 2005. 87 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Tecnologia de Materiais e Processos de Fabricação – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Taubaté, Taubaté.

Os Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética (MARE) têm recebido muita atenção nas últimas cinco décadas, devido às suas aplicações nas indústrias de equipamentos eletro-eletrônicos e telecomunicações envolvendo o controle da emissão de radiação eletromagnética espúria, bem como no setor militar, envolvendo a redução da assinatura radar de plataformas terrestres, marítimas e aéreas.

O objetivo do presente trabalho é mostrar o estudo da interação onda-matéria de formulações de MARE baseados em dois tipos de ferritas, MnZn e Ba, em matriz do tipo epóxi, na faixa de frequências compreendidas entre 8 e 12 GHz. Os MARE foram preparados variando-se a concentração e o tamanho de partícula das ferritas MnZn e Ba, sendo fixada a espessura em 3,0 mm. A caracterização eletromagnética foi realizada pelo método de guia de onda, onde foram medidos os coeficientes de transmissão (E_t) e reflexão ($E_{r-livre}$), utilizados para o cálculo do coeficiente de absorção (E_a). Também foi medido o coeficiente de reflexão do MARE quando posicionado sobre uma placa metálica ($E_{r-placa}$), para avaliar a capacidade do MARE em reduzir o coeficiente de reflexão do metal (100% de reflexão).

Os resultados obtidos demonstram que o aumento da concentração de ferrita MnZn ou Ba no MARE provoca um aumento do coeficiente de reflexão (E_r), diminuição do coeficiente de transmissão (E_t) e o aumento do coeficiente de absorção (E_a) no MARE. Não foram observadas mudanças de comportamento de $E_{r-livre}$, E_t e E_a com a variação do tamanho de partícula, nas faixas de ϕ estudadas. O posicionamento do MARE sobre uma placa metálica 100% refletiva altera o comportamento do coeficiente de reflexão, que passa a diminuir com o aumento da concentração de ferrita, devido às múltiplas reflexões que acontecem na estrutura interna do MARE e ao efeito de cancelamento da onda pela inversão de fase em 180° , obtido pela espessura elétrica do MARE próxima de $\frac{1}{4}$ de comprimento de onda.

Palavras-chave: Materiais absorvedores de radiação eletromagnética, aditivos magnéticos, ferrita de MnZn, ferrita de Ba, espessura elétrica.

ABSTRACT

Radar absorbing materials (RAM) had received much attention in the last five decades, due to its applications in the electronic equipment and telecommunications industries, involving the spurious electromagnetic radiation emission control, as well as in the military area, involving radar signature reduction of terrestrial, aerial and maritime platforms.

The aim of the present work is to show the wave-matter interaction study of RAM formulations based on two types of ferrites, MnZn and Ba, in epoxy resin matrix, over the frequency range of 8 – 12 GHz. RAM was prepared varying the concentration and particle size of MnZn and Ba ferrites, with thickness fixed to 3,0 mm. The electromagnetic characterization was carried out using wave guide method, where transmission (E_t) and reflection ($E_{r-livre}$) coefficients were measured, both used for absorption coefficient (E_a) calculation. Reflection coefficient was measured with the RAM positioned on a metallic plate, to evaluate the RAM capacity to reduce the metal reflection coefficient (100% reflecting structure).

The results demonstrate that the increase of MnZn or Ba ferrite concentration in the RAM improves reflection coefficient ($E_{r-livre}$) increase, transmission coefficient (E_t) reduction and absorption coefficient (E_a) increase. Changes of $E_{r-livre}$, E_t and E_a behavior was not observed with the particle size variation in the studied bands. RAM positioned on a 100% reflecting metallic plate modifies the reflection coefficient behavior, that reduces with the increase of ferrite concentration, due to the multiple reflections in the RAM internal structures and the wave cancellation effect by 180° phase inversion, obtained by the RAM electrical thickness near $\frac{1}{4}$ wavelength.

Keywords: RAM, radar absorbing material, magnetic additives, MnZn ferrite, Ba ferrite, electrical thickness.

SUMÁRIO

Resumo.....	v
Abstract.....	vi
Lista de Figuras.....	ix
Lista de Equações.....	xiv
Lista de Tabelas.....	xv
Lista de Símbolos.....	xvi
1 Introdução.....	17
1.1 Justificativa e objetivos.....	20
2 Revisão da literatura.....	24
2.1 Conceitos fundamentais.....	24
2.2 Materiais absorvedores de radiação eletromagnética – MARE.....	27
2.3 Propriedades eletromagnéticas dos MARE.....	28
2.3.1 Permissividade elétrica.....	29
2.3.2 Permeabilidade magnética.....	30
2.3.3 Tangente de perda.....	31
2.3.4 Impedância.....	32
2.3.5 Espessura elétrica.....	32
2.4 Tipos de MARE.....	35
2.4.1 Absorvedores de microondas ressonantes ou sintonizados.....	35
2.4.2 Absorvedores de cavidades ressonantes.....	36
2.4.3 Absorvedores de microondas em espaço livre.....	37
2.4.4 Absorvedores de carga.....	39
2.5 Composição dos MARE.....	39
2.5.1 Aditivos dielétricos.....	39
2.5.2 Aditivos magnéticos.....	40
2.5.2.1 Ferritas.....	41
2.5.3 Matrizes.....	47
3 Materiais e métodos.....	49
3.1 Materiais utilizados na preparação dos MARE.....	49

3.2 Métodos e equipamentos usados na caracterização dos corpos-de-prova.	51
4 Resultados e discussão.....	55
4.1 Resina epóxi.....	55
4.1.1 Energia refletida ($E_{r-livre}$).....	55
4.1.2 Energia transmitida (E_t).....	56
4.1.3 Energia absorvida (E_a).....	57
4.2 Ferrita de MnZn.....	58
4.2.1 Energia refletida ($E_{r-livre}$).....	59
4.2.2 Energia transmitida (E_t).....	60
4.2.3 Energia absorvida (E_a).....	62
4.2.4. Energia refletida ($E_{r-placa}$).....	66
4.3 Ferrita de Ba.....	69
4.3.1 Energia refletida ($E_{r-livre}$).....	69
4.3.2 Energia transmitida (E_t).....	71
4.3.3 Energia absorvida (E_a).....	73
4.3.4 Energia refletida ($E_{r-placa}$).....	75
5 Conclusões.....	78
5.1 Sobre a ferrita de MnZn.....	78
5.2 Sobre a ferrita de Ba.....	78
6 Sugestões para trabalhos futuros.....	80
7 Produção técnico-científica gerada durante o trabalho.....	81
8 Referências bibliográficas.....	82
9 Anexo A.....	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Navio americano <i>Sea Shadow</i> (AVIATION, 2005).....	18
Figura 2 – Aeronave americana F-117 (AVIATION, 2005).....	19
Figura 3 – Esquema geral do princípio de conservação da energia da onda eletromagnética incidente sobre um determinado material (■). E_i – Energia incidente, E_a – Energia absorvida, E_t – Energia transmitida, $E_{r-livre}$ – Energia refletida no MARE livre (SUCHER, et al., 1980; KNOTT, et al., 1985).....	21
Figura 4 – Esquema geral da conservação da energia da onda eletromagnética incidente em um determinado material (■), colocado sobre uma placa metálica 100% refletiva. E_i – energia incidente, $E_{r-placa}$ – energia refletida no MARE posicionado sobre uma placa metálica, E_a – energia absorvida.....	21
Figura 5 – Câmara anecóica (ESA, 2005).....	23
Figura 6 – Componente elétrica (E) e magnética (B) de uma onda eletromagnética (ESPAÇO CIENTÍFICO E CULTURA, 2005).....	24
Figura 7 – Espectro eletromagnético.....	25
Figura 8 – Esquema representativo da propagação de onda eletromagnética refletindo em um sistema com duas placas - uma placa frontal e uma placa posterior – em dois instantes distintos: t_1 e $(t_1 + \frac{1}{2} T)$	33
Figura 9 – Esquema de reflexão de onda em um MARE (■) posicionado sobre um metal 100% refletor (■) – ■ onda incidente (E_i), ■ reflexão frontal (E_{r1}), ■ reflexão posterior ($E_{r2}, E_{r3}, \dots, E_{rn}$), ■ transmissão na interface meio externo/MARE (E_t), ■ múltiplas reflexões internas no MARE.....	34
Figura 10 – MARE do tipo manta flexível (R&F PRODUCTS, 2005).....	36
Figura 11 – MARE sintonizado utilizado em aparelhos de telefonia móvel celular (PERSEUS, 2005).....	36
Figura 12 – Absorvedor de cavidade ressonante (DIXON, 2004).....	37
Figura 13 – Esquema de aplicação de MARE em cavidades ressonantes.....	37
Figura 14 – Absorvedor de microondas em espaço livre (PERSEUS, 2005b).....	38
Figura 15 – Câmara anecóica com absorvedores de microondas em espaço livre (AIRPOWER, 2005).....	38

Figura 16 – Variação da permissividade do negro de fumo com a frequência (NALWA, 1997).....	40
Figura 17 – Célula unitária da estrutura espinélio (SOOHOO, 1960).....	41
Figura 18 – Espectro Mössbauer do ferro puro (BURGOV, SKLYAREVSKI, 1969).....	44
Figura 19 – Espectro Mössbauer da ferrita de MnZn com tamanho de partícula $\phi < 0,2\mu\text{m}$ (NOHARA, 2003).....	45
Figura 20 – Espectro Mössbauer da ferrita de MnZn com tamanho de partícula $0,2\mu\text{m} < \phi < 10 \mu\text{m}$ (NOHARA, 2003).....	45
Figura 21 – Espectro Mössbauer da ferrita de MnZn com tamanho de partícula $\phi > 200\mu\text{m}$ (NOHARA, 2003).....	46
Figura 22 – Curva de absorção de MARE, de 2- 40 GHz, com diferentes distribuições de tamanho de partícula. Curva em azul: $\phi > 200\mu\text{m}$; curva em vermelho: $0,2 \mu\text{m} < \phi < 10 \mu\text{m}$ (NOHARA, 2003).....	46
Figura 23 – Relação entre as relações mássicas ferrita:resina com a % em massa de ferrita, nos corpos-de-prova.....	50
Figura 24 – Retificação dos corpos-de-prova epóxi/ferrita para ensaio no guia de onda.....	51
Figura 25 – Acoplador direcional utilizado para medidas em guia de onda (8-12 GHz).....	52
Figura 26 – Suporte das amostras no sistema de guia de onda (8 – 12 GHz). (a) amostra não encaixada no suporte. (b) amostra encaixada no suporte..	52
Figura 27 – Esquema de ligação do guia de onda para determinação da energia refletida pela amostra ($E_{R\text{-livre}}$).....	53
Figura 28 – Esquema de ligação do guia de onda para determinação da energia transmitida pela amostra (E_t).....	54
Figura 29 – Medida em guia de onda da energia refletida ($E_{R\text{-livre}}$) pela resina epóxi pura.....	55
Figura 30 – Medida em guia de onda da energia transmitida (E_t) pela resina epóxi pura.....	57
Figura 31 – Cálculo da energia absorvida (E_a) pela resina epóxi pura, utilizando a Equação 2.....	58

Figura 32 – Distribuição da energia da onda eletromagnética na resina epóxi pura (E_a , E_t e $E_{r-livre}$), em 9 e 11 GHz.....	58
Figura 33 – Medida em guia de onda da energia refletida ($E_{r-livre}$) da resina epóxi aditada com ferrita de MnZn, nas proporções em massa igual a 1:10, 2:10, 3:10, 4:10, 5:10, 6:10 e 7:10, com tamanho de partícula $\phi < 38 \mu\text{m}$	59
Figura 34 – Energia refletida ($E_{r-livre}$) da resina epóxi aditada com ferrita de MnZn de tamanho de partícula $\phi < 38 \mu\text{m}$, nas frequências 9 GHz (azul) e 11 GHz (vermelho).....	60
Figura 35 – Medida em guia de onda da energia transmitida (E_t) da resina epóxi aditada com ferrita de MnZn, nas proporções em massa 1:10, 2:10, 3:10, 4:10, 5:10, 6:10 e 7:10, com tamanho de partícula $\phi < 38\mu\text{m}$	61
Figura 36 – Energia transmitida (E_t) da resina epóxi aditada com ferrita de MnZn de tamanho de partícula $\phi < 38 \mu\text{m}$, nas frequências 9 GHz (azul) e 11 GHz (vermelho).....	62
Figura 37 – Valores calculados pela Equação 2 para a energia absorvida (E_a) da resina epóxi aditada com ferrita de MnZn, nas proporções em massa igual a 1:10, 2:10, 3:10, 4:10, 5:10, 6:10 e 7:10, com tamanho de partícula $\phi < 38\mu\text{m}$	63
Figura 38 – Energia absorvida (E_a) da resina epóxi aditada com ferrita de MnZn de tamanho de partícula $\phi < 38 \mu\text{m}$, nas frequências 9 GHz (azul) e 11 GHz (vermelho).....	63
Figura 39 – Distribuição da energia da onda eletromagnética na resina epóxi aditada com ferrita de MnZn na proporção em massa ferrita:resina 7:10, com tamanho de partícula $\phi < 38 \mu\text{m}$ – (E_a , E_t e $E_{r-livre}$), em 9 e 11 GHz.....	64
Figura 40 – Valores calculados pela Equação 2 para a energia absorvida (E_a) da resina epóxi aditada com ferrita de MnZn, na proporção em massa igual a 7:10, com tamanho de partícula $\phi < 38 \mu\text{m}$, $38 \mu\text{m} < \phi < 75\mu\text{m}$ e $75 \mu\text{m} < \phi < 150 \mu\text{m}$	65

Figura 41 – Medida em guia de onda da energia refletida ($E_{R-placa}$) da resina epóxi aditada com ferrita de MnZn, nas proporções em massa igual a 1:10, 2:10, 3:10, 4:10, 5:10, 6:10 e 7:10, com tamanho de partícula $\phi < 38 \mu\text{m}$, colocada sobre uma placa metálica 100% refletiva.....	66
Figura 42 – Energia refletida ($E_{R-placa}$) da resina epóxi aditada com ferrita de MnZn de tamanho de partícula $\phi < 38 \mu\text{m}$, nas frequências 9 GHz (azul) e 11 GHz (vermelho).....	67
Figura 43 – Esquema de reflexão de onda em um MARE () com espessura elétrica igual a $\lambda/4$ –  onda incidente (E_i),  reflexão frontal (E_{r1}),  reflexão posterior ($E_{r2}, E_{r3}, \dots, E_m$),  transmissão na interface meio externo/MARE (E_t),  transmissão na interface MARE/meio externo ($E_{t-externo}$),  múltiplas reflexões internas no MARE.....	68
Figura 44 – Medida em guia de onda da energia refletida ($E_{R-livre}$) da resina epóxi aditada com ferrita de Ba, nas proporções em massa igual a 1:10, 2:10, 3:10, 4:10, 5:10, 6:10 e 7:10, com tamanho de partícula $\phi < 38 \mu\text{m}$	70
Figura 45 – Energia refletida ($E_{R-livre}$) da resina epóxi aditada com ferrita de Ba de tamanho de partícula $\phi < 38 \mu\text{m}$, nas frequências 9 GHz (azul) e 11 GHz (vermelho).....	71
Figura 46 – Medida em guia de onda da energia transmitida (E_t) da resina epóxi aditada com ferrita de Ba, nas proporções em massa 1:10, 2:10, 3:10, 4:10, 5:10, 6:10 e 7:10, com tamanho de partícula $\phi < 38 \mu\text{m}$	72
Figura 47 – Energia transmitida (E_t) da resina epóxi aditada com ferrita de Ba de tamanho de partícula $\phi < 38 \mu\text{m}$, nas frequências 9 GHz (azul) e 11 GHz (vermelho).....	73
Figura 48 – Valores calculados pela Equação 2 para a energia absorvida (E_a) da resina epóxi aditada com ferrita de Ba, nas proporções em massa igual a 1:10, 2:10, 3:10, 4:10, 5:10, 6:10 e 7:10, com tamanho de partícula $\phi < 38 \mu\text{m}$	74
Figura 49 – Energia absorvida (E_a) da resina epóxi aditada com ferrita de Ba de tamanho de partícula $\phi < 38 \mu\text{m}$, nas frequências 9 GHz (azul) e 11 GHz (vermelho).....	74

Figura 50 – Distribuição da energia da onda eletromagnética na resina epóxi aditada com ferrita de Ba na proporção em massa ferrita:resina 7:10, com tamanho de partícula $\phi < 38 \mu\text{m}$ – (E_a , E_t , $E_{r\text{-livre}}$), em 9 e 11 GHz.....	75
Figura 51 – Medida em guia de onda da energia refletida ($E_{r\text{-placa}}$) da resina epóxi aditada com ferrita de Ba, nas proporções em massa igual a 1:10, 2:10, 3:10, 4:10, 5:10, 6:10 e 7:10, com tamanho de partícula $\phi < 38 \mu\text{m}$, colocada sobre uma placa metálica 100% refletiva.....	76
Figura 52 – Energia refletida ($E_{r\text{-placa}}$) da resina epóxi aditada com ferrita de Ba de tamanho de partícula $\phi < 38 \mu\text{m}$, nas frequências 9 GHz (azul) e 11 GHz (vermelho).....	77

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Conservação da energia da onda eletromagnética incidente sobre um material.....	21
Equação 2 – Conservação da energia da onda eletromagnética incidente sobre um material colocado sobre uma placa 100% refletiva.....	21
Equação 3 – Velocidade da radiação eletromagnética como uma função da permissividade elétrica e permeabilidade magnética, no vácuo.....	25
Equação 4 – Equação da energia eletromagnética.....	25
Equação 5 – Refração de ondas eletromagnéticas como função da velocidade da radiação eletromagnética.....	26
Equação 6 – Velocidade da radiação eletromagnética como função da permissividade elétrica e permeabilidade magnética, em um material qualquer.....	26
Equação 7 – Refração da onda como função da permissividade elétrica e permeabilidade magnética, relativas.....	26
Equação 8 – Relação entre impedância relativa e permissividade elétrica e permeabilidade magnética.....	27
Equação 9 – Variação de energia em um material qualquer.....	27
Equação 10 – Permissividade elétrica como uma grandeza complexa.....	29
Equação 11 – Permeabilidade magnética como uma grandeza complexa.....	31
Equação 12 – Tangente de perda elétrica.....	32
Equação 13 – Tangente de perda magnética.....	32
Equação 14 – Coeficiente de reflexão de ondas eletromagnéticas.....	32
Equação 15 – Atenuação da energia de onda eletromagnética.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Valores de permissividade (ϵ'), permeabilidade (μ') e tangente de perda ($\text{tg}\delta$) de ferritas espinélio típicas, tratadas à temperatura máxima de 1300°C, obtidos a 4,5 GHz (AULOCK, 1965).....	43
Tabela 2 –	Propriedades elétricas típicas de matrizes poliméricas (LEE, 1991).....	48

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

- λ – comprimento de onda
- Ω – ohm
- μ – permeabilidade magnética
- ϵ – permissividade elétrica
- ϕ – tamanho de partícula
- Ba** – bário
- Ca** – cálcio
- Co** – cobalto
- CoO** – óxido de cobalto
- Cu** – cobre
- dB** – decibel
- E_a – energia absorvida
- E_i – energia incidente
- E_r – energia refletida
- $E_{r-livre}$ – energia refletida no MARE livre
- $E_{r-placa}$ – energia refletida no MARE posicionado sobre uma placa metálica
- E_t – energia transmitida
- Fe** – ferro
- GHz** – Gigahertz
- Li** – lítio
- MARE** – materiais absorvedores de radiação eletromagnética
- Mg** – magnésio
- Mn** – manganês
- Ni** – níquel
- tg δ** – tangente de perda
- Ti** – titânio
- W/m²** – Watt por metro quadrado
- Z** – impedância
- Zn** – zinco

1 Introdução

Os Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética – MARE – pertencem a uma classe que é denominada de materiais compósitos. De uma maneira geral, pode-se considerar um material compósito como sendo qualquer material constituído de várias fases, que exiba uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases que o constituem, de tal modo que é obtida uma melhor combinação de propriedades.

Existe uma variedade de compósitos que ocorre na natureza, tais como a madeira, que consiste de celulose em forma de fibras ocas (alta rigidez), envolvidas e unidas por lignocelulose (dúctil), e como os ossos que são compósitos constituídos pela proteína conhecida por colágeno (dúctil) e pelo mineral apatita (alta rigidez). Em engenharia, quando do projeto de materiais compósitos artificiais, combinam-se metais, cerâmicas e polímeros para produzir uma nova geração de materiais com extraordinárias características, quase sempre criada para melhorar combinações de características mecânicas, tais como a rigidez, tenacidade e resistência nas condições ambientes e a altas temperaturas (CALLISTER, 2002).

Os MARE recebem esta denominação porque possuem características de absorção da energia da onda eletromagnética, e são classificados em duas amplas categorias: MARE dielétricos e magnéticos (LAX, 1962).

Os MARE do tipo dielétricos interagem com o campo elétrico da onda eletromagnética, e esta interação está relacionada às suas propriedades elétricas, particularmente sua permissividade, ϵ . Os MARE do tipo magnéticos interagem com o campo magnético da onda eletromagnética, sendo que esta interação está relacionada com suas propriedades magnéticas, particularmente sua permeabilidade, μ (LAX, 1962 ;LEE, 1991). Pode-se citar como exemplo de MARE dielétricos materiais compósitos obtidos pela adição de negro de fumo ou grafite em uma matriz de resina epóxi (LEE, 1991) e como exemplo de MARE magnéticos pode-se citar aqueles materiais compósitos preparados por dispersão de ferritas também em um meio de resina epóxi (LEE, 1991; CHO, 1996).

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

estruturas menos reflexivas ao sinal de radar (LEE, 1991). A refletividade de uma estrutura ao sinal emitido por radar pode ser função das propriedades desse material, como também da geometria dessa estrutura. Essa geometria pode ser tal que o ângulo de incidência do sinal pode favorecer um espalhamento deste sinal em direções não detectáveis pelo radar emissor (LEE, 1991; NOHARA, 2003). Exemplos dessas estruturas podem ser vistas nas Figuras 1 e 2.

Nos últimos anos, diversos autores têm enfatizado em seus trabalhos (CHO, 1996; GORSHENEV, 1997; DIAS, 2000; SILVA, 2000; NOHARA, 2003) a importância da permissividade e da permeabilidade de materiais absorvedores de radiação eletromagnética, além da tangente de perda ($\text{tg } \delta$) e da diferença entre as impedâncias (Z) do material absorvedor e do meio externo, para a faixa compreendida entre 8 e 12 GHz, faixa esta de grande importância militar por ser a banda de frequências em que trabalha a maioria dos radares responsáveis pelo traqueamento de aeronaves com maior precisão em termos de azimute, altura e velocidade.



Figura 1. Navio americano *Sea Shadow* (AVIATION, 2005)



Figura 2. Aeronave americana F-117 (AVIATION, 2005)

A motivação para a elaboração e o desenvolvimento deste trabalho de mestrado deve-se, principalmente, às necessidades crescentes de materiais, e às restrições cada vez maiores nos setores de importação de materiais considerados estratégicos, envolvendo as áreas de materiais avançados para os setores aeroespacial e de telecomunicações. Em resposta a estas necessidades, trabalhos de pesquisa e desenvolvimento têm sido realizados no Brasil visando a nacionalização de materiais e processos e a conseqüente autonomia do país na obtenção e no processamento de materiais absorvedores de radiação eletromagnética, principalmente para o setor aeroespacial (NOHARA, 1999a; NOHARA, 1999b; DIAS, 2000; NOHARA, 2000; SILVA, 2000; NOHARA, 2001a; NOHARA, 2001b; MIACCI, 2002; NOHARA, 2003). Nesse sentido, Nohara, 1999; Nohara, 2000, Dias, 2000; Silva, 2000 e Nohara, 2001a desenvolveram metodologias de processamento de materiais absorvedores na Divisão de Materiais/IAE, localizado no Centro Técnico Aeroespacial – CTA, tendo sido esses trabalhos encaminhados para pedido de privilégio de patentes no INPI.

Miacci, 2002, implementou, também na Divisão de Materiais/IAE no CTA, algumas metodologias de caracterização eletromagnética aplicadas aos MARE e também desenvolveu um método de medida de seção reta radar, conhecida como RCS (*Radar Cross Section*). Nohara, 2003, em sua tese de doutorado, apresentou métodos de processamento e caracterização de MARE obtidos a partir da combinação de compósitos dielétricos avançados e ferritas.

1.1 Justificativa e objetivos

As informações hoje existentes em literatura se resumem a dados dispersos sobre conceitos ou dados de divulgação do potencial de aplicação de MARE, ou aditivos para tais materiais. Reconhecendo a importância estratégica no domínio do conhecimento dessa área e as insuficientes atividades de pesquisa sobre este tema, no âmbito nacional, este trabalho se propõe a estudar os seguintes pontos:

1. Efeito do tamanho de partícula da ferrita MnZn no comportamento da atenuação da energia da onda eletromagnética. Nohara, 2003, em sua tese de doutorado, relacionou o comportamento de absorção de microondas e espectros Mössbauer da ferrita MnZn com os seguintes tamanhos de partículas: $\phi < 0,2 \mu\text{m}$, $0,2 \mu\text{m} < \phi < 10 \mu\text{m}$ e $\phi > 75 \mu\text{m}$. Este trabalho apresenta uma complementação do estudo realizado por Nohara, 2003, utilizando o mesmo tipo de ferrita MnZn, pela determinação da relação do comportamento de atenuação da energia da onda eletromagnética com os tamanhos de partículas $\phi < 38 \mu\text{m}$, $38 \mu\text{m} < \phi < 75 \mu\text{m}$ e $75 \mu\text{m} < \phi < 150 \mu\text{m}$, e concentrações de ferrita:resina epóxi nas proporções de 1:10, isto é, uma concentração de 1 parte de ferrita em 10+1 (11) partes do compósito final, perfazendo um total de 9,1% em massa de ferrita, e proporções de 2:10 (17,7%), 3:10 (23,1%), 4:10 (28,5%), 5:10 (33,3%), 6:10 (37,5%) e 7:10 (41,1%), todos para uma espessura fixa de 3,0 mm.

2. Estudo do comportamento de atenuação da energia da onda eletromagnética de ferritas hexagonais de Ba, baseada em uma faixa de tamanho de partícula de $\phi < 37 \mu\text{m}$, nas mesmas condições de concentração e espessura da ferrita MnZn.

3. Caracterização eletromagnética do MARE em guia de onda em duas situações distintas. A primeira situação, esquematizada na Figura 3, envolve a determinação da energia transmitida (E_t) e da energia refletida ($E_{R\text{-livre}}$) em guia de onda, e cálculo da energia absorvida (E_a) pela Equação 1. A segunda situação, esquematizada na Figura 4, envolve a determinação da energia refletida ($E_{R\text{-placa}}$) com uma placa metálica posicionada sob o MARE, ou seja, a energia refletida $E_{R\text{-placa}}$ avalia a capacidade do MARE em reduzir a reflexão de uma estrutura 100% refletora (placa metálica); e cálculo da energia absorvida (E_a) pela Equação 2.

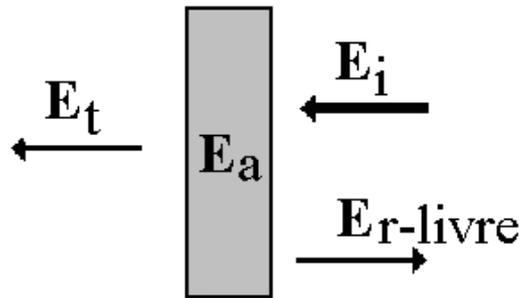


Figura 3. Esquema geral do princípio de conservação da energia da onda eletromagnética incidente sobre um determinado material (■). E_i – Energia incidente, E_a – Energia absorvida, E_t – Energia transmitida, $E_{r-livre}$ – Energia refletida no MARE livre (SUCHER, et al., 1980; KNOTT, et al., 1985)

$$\mathbf{E_i = E_{r-livre} + E_t + E_a} \quad (1)$$

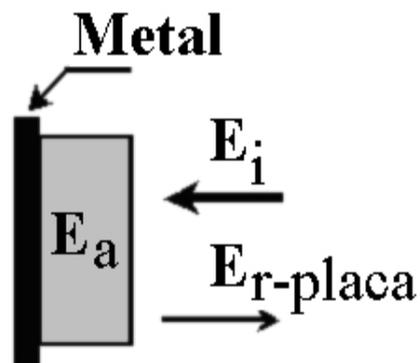


Figura 4. Esquema geral da conservação da energia da onda eletromagnética incidente em um determinado material (■), colocado sobre uma placa metálica 100% refletora. E_i – energia incidente, $E_{r-placa}$ – energia refletida no MARE posicionado sobre uma placa metálica, E_a – energia absorvida

$$\mathbf{E_i = E_{r-placa} + E_a} \quad (2)$$

Dentre os benefícios que os dados aqui apresentados trarão tanto à indústria aeronáutica do país, quanto ao setor privado, por exemplo, nas áreas de telecomunicações, médica e automobilística, pode-se destacar:

- o domínio na área de processamento de MARE, com propriedades de absorção de comprimentos de ondas previamente especificados, em função da formulação preparada.
- Os MARE obtidos poderão ser utilizados como proteção de locais situados próximos às estações rádio-base (ERBs) do sistema celular e de torres de telecomunicações que transmitem sinais eletromagnéticos de alta potência; como absorvedor em cavidades ressonantes e também como material redutor dos lóbulos laterais de antenas usadas em radares anticolisão, utilizados no setor automobilístico.
- Utilização em ambientes externos, como campos de medição da assinatura radar de plataformas terrestres e marítimas.
- O domínio da fabricação de absorvedores que poderá ser utilizado em telecomunicações para:
 - construção de câmaras anecóicas, tais como a da Figura 5;
 - construção de ambientes semi-anecóicos e
 - diminuição da reflexão de microondas de estruturas de pequeno, médio e grande porte com baixo custo.



Figura 5. Câmara anecóica (ESA, 2005)

2 Revisão da literatura

2.1 Conceitos fundamentais

Em virtude deste trabalho estar relacionado com a absorção da onda eletromagnética e suas características elétricas e magnéticas, tais como a permissividade e a permeabilidade dos meios materiais, é necessário que se faça uma apresentação da teoria relacionada com o fenômeno. Portanto, esta seção discute alguns dos princípios e conceitos básicos relacionados à natureza da radiação eletromagnética, bem como suas possíveis interações com os materiais sólidos. A seguir, são explorados os comportamentos eletromagnéticos dos materiais metálicos e dos não-metálicos em termos das suas propriedades de absorção, reflexão e transmissão da onda eletromagnética.

A radiação eletromagnética é considerada como sendo predominantemente ondulatória, consistindo em componentes de campo elétrico e de campo magnético, os quais são perpendiculares um ao outro e também à direção da propagação. Esquemáticamente, pode-se representar a onda eletromagnética conforme a Figura 6.

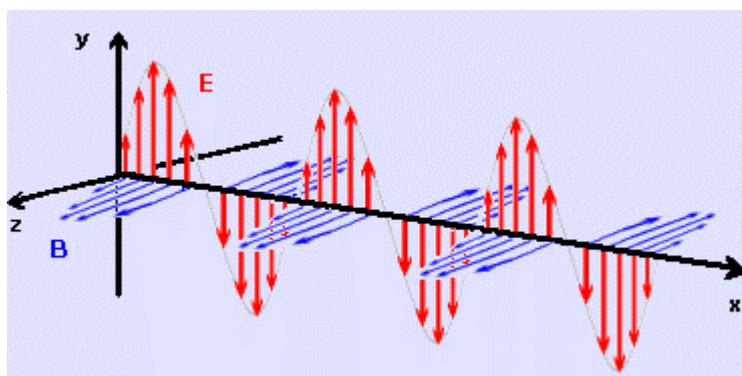


Figura 6. Componentes elétrica (E) e magnética (B) de uma onda eletromagnética (ESPAÇO CIENTÍFICO E CULTURA, 2005)

Tanto a luz, quanto o calor e as microondas, como também as ondas de rádio, são formas de radiação eletromagnética. Cada uma dessas formas é caracterizada por uma faixa específica de comprimentos de onda. O espectro eletromagnético da radiação está representado na Figura 7. As microondas estão na faixa compreendida entre 3 GHz e 300 GHz, com comprimento de onda desde 0,1 até 0,001 m, respectivamente.

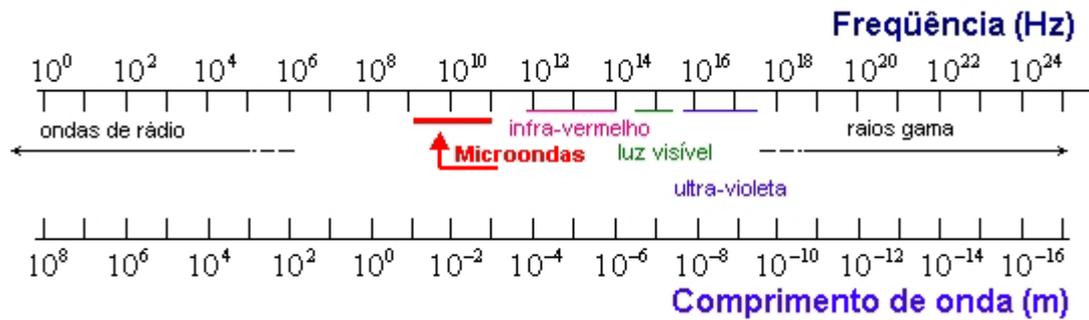


Figura 7. Espectro eletromagnético

Toda radiação eletromagnética atravessa o vácuo à mesma velocidade, conhecida como a velocidade da luz, qual seja, $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$. Esta velocidade está relacionada à permissividade elétrica do vácuo, ϵ_0 , e à permeabilidade magnética do vácuo, μ_0 , pela Equação 3 (SLATER, 1947; REITZ, 1982).

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} \quad (3)$$

Dessa forma, existe uma associação entre a constante, c , e essas constantes elétrica e magnética. Visto que a radiação, de uma perspectiva quântico-mecânica, é composta por fótons, pode-se representar a energia eletromagnética, ou, a energia de um fóton, E , pela Equação 4 (SLATER, 1947; REITZ, 1982).

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \quad (4)$$

onde:

h = constante de Planck = $6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$,

ν = frequência da onda eletromagnética (Hz),

λ = comprimento de onda (m).

Assim, a energia eletromagnética é proporcional à frequência da radiação, ν , ou inversamente proporcional ao comprimento de onda, λ (SLATER, 1947; REITZ, 1982).

Quando a onda eletromagnética passa de um meio para outro, como por exemplo, do ar para um material sólido, uma parte da radiação pode ser transmitida através do meio, uma parte pode ser absorvida e uma parte pode ser refletida na interface entre os dois meios. A intensidade, E_i , da radiação incidente sobre a superfície

do meio sólido deve ser igual à soma das intensidades das radiações transmitida, absorvida e refletida, representadas como E_t , E_a e E_r , respectivamente. Essa intensidade, expressa em W/m^2 , corresponde à energia que está sendo transmitida por unidade de tempo através de uma área unitária que é perpendicular à direção da propagação. Pode-se expressar esta relação em termos de transmissão, $T = E_t/E_i$, absorção, $A = E_a/E_i$ e reflexão, $R = E_r/E_i$, sendo $T + A + R = 1$ (CALLISTER, 2002).

Aquelas estruturas capazes de transmitir a radiação eletromagnética, com desprezível absorção e reflexão, são chamadas de transparentes àquela radiação. Para ondas eletromagnéticas na faixa de microondas, essa transparência torna-se muito dificultada em uma estrutura sólida qualquer, devido à reflexão que a onda eletromagnética sofre ao encontrar essas estruturas, em virtude da diferença entre as impedâncias do espaço livre e do material.

A onda eletromagnética que penetra nos MARE tem sua velocidade diminuída a partir da interface do material, em virtude da diferença de impedância entre os meios. Esse fenômeno é conhecido como refração da onda, n , representado pela Equação 5,

$$n = \frac{c}{v}, \quad (5)$$

onde: v é a velocidade da onda no material e, da mesma forma que a Equação 3 define a magnitude de c , a Equação 6 fornece a magnitude da velocidade da onda no material (SLATER, 1947; REITZ, 1982),

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \cdot \mu}}, \quad (6)$$

onde: ϵ e μ representam, respectivamente, a permissividade e a permeabilidade do material em questão. A partir da Equação 5, chega-se à Equação 7, onde ϵ_r e μ_r , representam, respectivamente, a constante dielétrica e a permeabilidade magnética relativas.

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\sqrt{\epsilon \cdot \mu}}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} = \sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r}. \quad (7)$$

Da mesma forma, as grandezas físicas permissividade e permeabilidade relativas definem a impedância intrínseca (Z) do material, conforme a Equação 8,

$$Z = Z_0 \sqrt{\mu_r / \epsilon_r}, \quad (8)$$

onde: Z_0 é a impedância intrínseca do vácuo (377Ω) (LEE, 1991; BALANIS, 1997).

A absorção da energia eletromagnética dos MARE está ligada ao fenômeno da ressonância, que está relacionado com o mecanismo de interação onda-matéria. O termo ressonância é normalmente usado para especificar a faixa de frequências que o material apresenta absorção da onda eletromagnética, dentro do espectro eletromagnético (CHO, 1996). As estruturas química e física dos materiais absorvedores de radiação eletromagnética possuem mecanismos internos que convertem a energia da onda eletromagnética incidente nesse tipo de material, em calor. A quantidade de energia absorvida é a mesma quantidade de energia emitida em forma de calor pelo material, e segue a Equação 9 (BALANIS, 1997),

$$\Delta E = h\nu. \quad (9)$$

Uma vez que, os estados de energia para os átomos são discretos, existem valores de ΔE específicos entre os níveis de energia. Isso faz com que apenas a radiação eletromagnética com frequência que corresponde ao valor de ΔE para o átomo pode ser absorvido pelas transições eletrônicas.

2.2 Materiais absorvedores de radiação eletromagnética – MARE

Os materiais absorvedores de radiação eletromagnética são materiais compósitos formados por um ou mais materiais absorvedores dielétricos, tais como grafite ou negro de fumo, ou magnéticos, tais como ferritas, dispersos em uma matriz polimérica rígida, como aquelas formadas por resina epóxi ou poliuretânica, ou flexível, como aquelas produzidas com elastômeros à base de silicone ou borrachas natural ou sintética, ou ainda espumas, tais como as poliuretânicas (LEE, 1991; SILVA, 2000). Alguns MARE também são obtidos de estruturas híbridas sendo usados como aditivos tanto materiais dielétricos como magnéticos.

A aplicação que se pretende dar ao material absorvedor define sua estrutura, aspecto e composição. Aplicações que exigem alta resistência mecânica e alta resistência às intempéries exigem que o MARE seja processado utilizando resinas termorrígidas, tais como as epóxi e as poliuretânicas (JOHNSON, 1992; GEAR, 2004). No caso de cavidades ressonantes, utilizam-se MARE formados com materiais flexíveis, em função da necessidade do material ter que se moldar às cavidades sem, no entanto, atender requisitos de alta resistência mecânica (JOHNSON, 1992; GEAR, 2004). Outras estruturas devem apresentar relativamente elevada propriedade estrutural, mas com baixo peso, exigindo materiais em forma de colméia, como os *honeycombs* e de espumas rígidas (JOHNSON, 1992; GEAR, 2004).

O que vai determinar o tipo de aditivo a ser utilizado na elaboração de um MARE é a intensidade que se pretende absorver ou atenuar o sinal da onda, a faixa de frequência da onda eletromagnética que se pretende trabalhar, além de aspectos estruturais de aplicação do MARE, tais como resistências mecânica, térmica, e às intempéries, flexibilidade, resistência a altas temperaturas, entre outras (JOHNSON, 1992; GEAR, 2004).

2.3 Propriedades eletromagnéticas dos MARE

O que diferencia os MARE de outros materiais são as grandezas da sua permissividade elétrica (ϵ), da sua permeabilidade magnética (μ), da sua tangente de perda ($\text{tg } \delta$) e da sua impedância (Z). Por meio do controle do tipo de material (dielétrico ou magnético), de sua espessura, do fator de perda e da impedância, o desempenho dos MARE pode ser otimizado para uma estreita faixa de frequências, múltiplas frequências ou a um espectro de frequências de banda larga (LEE, 1991, YUSOFF, 2002).

O comportamento das ferritas com relação às suas propriedades eletromagnéticas tem sido estudado ao longo das últimas décadas. Num desses estudos, Giannakopoulou, 2002, relata o comportamento da permissividade e da permeabilidade de ferritas de Ni na faixa de 0,1 a 13 GHz, utilizando guia de onda coaxial. As propriedades eletromagnéticas de borracha natural aditada com uma ferrita de Li-Ni-Zn, também foram estudadas por Yusoff, 2002, onde é relatado que a incorporação de ferrita na matriz de borracha reduziu a perda dielétrica mas aumentou a perda magnética. A influência nos parâmetros eletromagnéticos da substituição parcial de

NiZn por Co em uma ferrita de NiZn, foi estudada por Cho, 1996, onde foi estudado que a variação da quantidade de CoO em um material compósito obtido pela adição da ferrita em uma matriz de silicone, altera a relação entre os parâmetros magnéticos e a frequência onde ocorre o máximo de absorção.

Outros trabalhos também investigaram as propriedades eletromagnéticas dos MARE. Nakamura, 1994, estudou o comportamento da permeabilidade em materiais compósitos preparados com ferrita de NiZn. Bober, 1997, estudou o comportamento de das propriedades elétricas e magnéticas em função da adição de ferrita de MnZn, ferrita de Sr, ferrita de NiZn, titanato de bário e pó de grafite em resina epóxi. Gorshenev, 1997, avaliou a influência da concentração de grafite em materiais preparados com resina acetona-formaldeído. O efeito da substituição de Ni e Ti em ferrita hexagonal de Ca sobre a permeabilidade, permissividade e a absorção de microondas foi estudado por Singh, 2000.

2.3.1 Permissividade elétrica

A permissividade elétrica de um material (ϵ) está ligada ao processo de armazenamento e dissipação da energia de um campo elétrico a que esse material é submetido quando é colocado sob sua ação. Como pode ser visto na Equação 10, a grandeza permissividade elétrica é uma grandeza complexa e, portanto, dependente de dois termos. Cada um desses termos está ligado a uma parte desse processo de armazenamento e dissipação de energia. O termo real (ϵ') está ligado ao processo de armazenamento, enquanto o termo imaginário (ϵ''), está ligado ao processo de dissipação (SOOHOO, 1960):

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' . \quad (10)$$

Um material dielétrico é um material que exhibe, ou pode ser modificado de tal maneira que exhiba, uma estrutura de dipolo elétrico, ou seja, uma estrutura que tenha uma separação das entidades eletricamente carregadas positivas e negativas em um nível molecular ou atômico. Quando um campo elétrico é aplicado em um dielétrico ocorre a formação de vários dipolos elétricos, que se alinham conforme a orientação do campo elétrico aplicado (BALANIS, 1997). A polarização elétrica em dielétricos pode ser produzida pelos seguintes modos (BALANIS, 1997;CALLISTER, 2002):

- a) Polarização de orientação: ocorre somente em materiais que possuem momentos dipolo permanentes. Na ausência de campo, os dipolos permanentes ficam distribuídos aleatoriamente, porém sob a aplicação de um campo elétrico, os dipolos se orientam com a direção do campo aplicado, armazenando energia. Esse armazenamento está ligado à permissividade elétrica do material, pelo seu termo real (ϵ'). Naturalmente, o material tende a se despolarizar, gerando corrente elétrica e a conseqüente dissipação da energia armazenada. Do mesmo modo que o armazenamento, essa dissipação está ligada à permissividade elétrica do material, agora pelo seu termo imaginário (ϵ'') (CALLISTER, 2002).
- b) Iônica ou polarização molecular: ocorre em materiais que apresentam íons positivos e negativos. Um campo aplicado atua no deslocamento dos cátions em uma direção e dos ânions na direção oposta, o que dá origem a um momento dipolo líquido.
- c) Polarização eletrônica: este tipo de polarização é encontrado em todos os materiais dielétricos, e atua no sentido de deslocar o núcleo do átomo em relação ao centro atômico em virtude do campo elétrico externo aplicado. Obviamente essa polarização deixa de existir quando o campo elétrico não está presente.

Pelo exposto acima, pode-se afirmar que as propriedades dielétricas importantes nos MARE são a constante dielétrica (ϵ) e a tangente de perda ($\text{tg } \delta$) do material. Essas quantidades dependem dos aditivos e da matriz de resina (LEE, 1991).

2.3.2 Permeabilidade magnética

Os absorvedores magnéticos têm como características principais, além da sua permissividade, a sua permeabilidade. A permeabilidade magnética de um material (μ) está ligada aos processos de armazenamento e dissipação da energia de um campo magnético a que esse material é submetido, quando é colocado sob sua ação. Assim, como foi descrito na Equação 10 para a permissividade elétrica, verifica-se na Equação 11 que a grandeza permeabilidade magnética também é uma grandeza complexa e, portanto, dependente de dois termos. Cada um desses termos também está ligado a uma parte desses processos de armazenamento e dissipação de energia, agora devido ao campo magnético. O termo real (μ') está ligado ao processo de armazenamento, enquanto o termo imaginário (μ''), está ligado ao processo de dissipação.

$$\mu = \mu' - j\mu'' . \quad (11)$$

A permeabilidade magnética está relacionada ao momento magnético dos átomos formadores de um material, que se deve ao momento de spin do elétron em razão da sua velocidade de rotação em torno do seu próprio eixo, e à rotação dos elétrons na eletrosfera em torno do núcleo dos átomos componentes do material. Nos absorvedores magnéticos, o fenômeno do armazenamento da energia da onda eletromagnética ocorre com a aceleração da rotação do elétron sobre seu próprio eixo, com o conseqüente aumento do momento de spin. A dissipação dessa energia ocorre quando o elétron, ao atingir grandes velocidades rotacionais, inverte seu spin. Alguns estudos nas últimas décadas têm sido realizados relacionando os termos complexos da permeabilidade relativa, com a frequência da onda eletromagnética (CHO, 1996; ACHER, 2000; MAOSHENG, 2003a; MAOSHENG, 2003b).

Pelo controle das propriedades magnéticas acima mencionadas e da quantidade de aditivo, o polímero aditado pode ser projetado para alcançar altos valores de permeabilidade, ou seja, pela seleção apropriada do aditivo, sua concentração e distribuição na estrutura do material, o absorvedor é sintonizado para atingir a tangente de perda magnética e a impedância com suas grandezas desejadas, para uma frequência em particular, múltiplas frequências selecionadas ou uma larga faixa de frequências.

Como os absorvedores magnéticos possuem tanto propriedades dielétricas como magnéticas e, portanto, graças a isso possuem a capacidade de interagir tanto com o campo elétrico como com o campo magnético da onda eletromagnética, os MARE obtidos a partir desses materiais são normalmente mais finos que os MARE dielétricos (MAOSHENG, 2003a), e podem ser obtidos em espessuras constantes ou conformados e fixados no local. Alguns absorvedores magnéticos têm um décimo da espessura de absorvedores dielétricos com absorção equivalente (LEE, 1991).

2.3.3 Tangente de perda

A tangente de perda elétrica é a relação entre as componentes real e imaginária da permissividade elétrica relativa e é calculada conforme a Equação 12. A tangente de perda magnética é a relação entre as componentes real e imaginária da permeabilidade magnética relativa e é dada pela Equação 13 (LEE, 1991).

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} \quad (12)$$

$$\operatorname{tg} \delta_m = \frac{\mu_r''}{\mu_r'} \quad (13)$$

2.3.4 Impedância

A onda eletromagnética que atravessa o espaço livre com impedância Z_0 , ao incidir sobre uma superfície dielétrica ou magnética/dielétrica com impedância Z_1 , sofre uma reflexão parcial (LEE, 1991). A magnitude desta reflexão é governada pela seguinte Equação 14,

$$R = \frac{1 - Z_1/Z_0}{1 + Z_1/Z_0}, \quad (14)$$

onde:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \quad e \quad Z_1 = \sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}}$$

e:

μ_0 e ε_0 são, respectivamente, permeabilidade e permissividade do espaço livre;

μ_1 e ε_1 são, respectivamente, permeabilidade e permissividade da superfície.

Para não haver reflexão, o coeficiente de reflexão deve ser zero, o que significa que $Z_0 = Z_1$. Esta condição é obtida quando $\mu_1/\varepsilon_1 = \mu_0/\varepsilon_0$.

O absorvedor ideal deve ter, portanto, $\mu_r = \varepsilon_r$ e tão grande quanto possível para obter a absorção em uma camada o mais fina possível. Infelizmente, em frequências de microondas, μ_r geralmente não é próxima da magnitude de ε_r . Portanto, projetos e materiais especiais devem ser utilizados na tentativa de superar este problema.

2.3.5 Espessura elétrica

Uma onda eletromagnética é uma perturbação que se propaga por um meio, por meio de um campo elétrico e um campo magnético, ambos perpendiculares entre si e se propagando na mesma direção. Toda onda, seja ela eletromagnética ou não, possui um

comprimento de onda e um período, sendo este último definido como o tempo necessário para que a onda percorra a distância de um comprimento de onda (Figura 8). Quando uma onda eletromagnética incide em uma estrutura não transparente, sofre reflexão como resultado de uma força de reação. Por se tratar de uma força de reação, a onda refletida tem a mesma energia, mas com a fase da sua amplitude invertida, conforme a terceira lei de Newton (ALONSO, 1972).

A Figura 8 mostra um esquema de reflexão de propagação de ondas, em dois instantes distintos separados por $\frac{1}{2}$ período (ondas de cor azul.). No instante t_1 ocorre a reflexão na placa frontal (R_f - onda de cor vermelha), e no instante $t_1 + \frac{1}{2} T$ reflete a onda de cor verde, na placa posterior (R_p). Quando as ondas R_f e R_p se encontram há anulação das suas energias em virtude da diferença de fase de 180° entre as ondas, a qual é provocada pela diferença no posicionamento da placa frontal e posterior em $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda (JOHNSON, 1992).

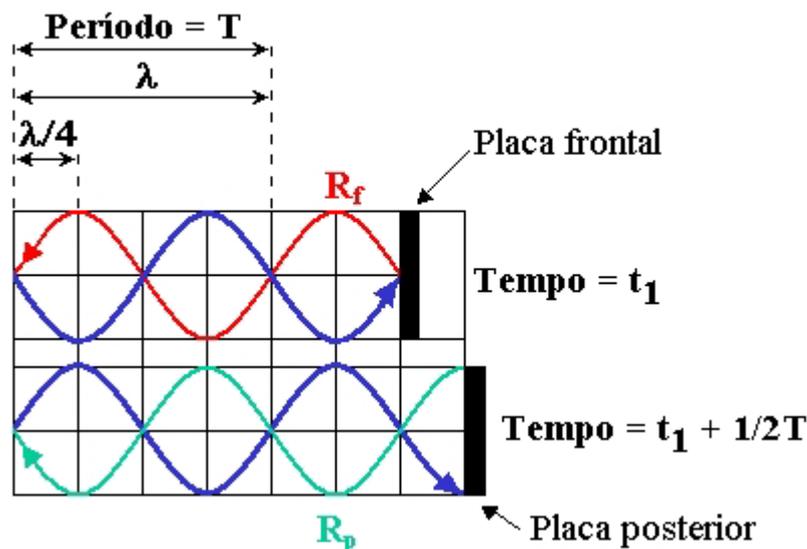


Figura 8. Esquema representativo da propagação de onda eletromagnética refletindo em um sistema com duas placas - uma placa frontal e uma placa posterior – em dois instantes distintos: t_1 e $(t_1 + \frac{1}{2} T)$

A Figura 9 mostra um esquema que detalha este mesmo fenômeno ocorrendo ao se utilizar um MARE posicionado sobre uma placa 100% refletiva (Figura 4). A onda eletromagnética incidente (E_i) sobre a superfície do MARE é parcialmente refletida (E_{r1}) e parcialmente transmitida (E_t) na sua superfície. A onda transmitida (E_t) é refletida no metal 100% refletor colocado sob o MARE. Parte dessa onda emerge do MARE (E_{r2}) para o meio externo, e parte é novamente refletida para seu interior,

provocando múltiplas reflexões internas, representadas pelas múltiplas setas de cor verde na Figura 9. A cada reflexão que a onda sofre no metal 100% refletor, parte dela emerge para o meio externo (E_{r2} , E_{r3} , ..., E_{rn}) e parte reflete novamente para o interior do MARE (LEE, 1991; JOHNSON, 1992).

O mecanismo de cancelamento das ondas refletidas frontalmente (E_{r1}) com as ondas refletidas posteriormente (E_{r2} , E_{r3} , ..., E_{rn}), em um MARE posicionado sobre uma placa 100% refletiva, é o mesmo mecanismo do cancelamento representado na Figura 8, ou seja, a espessura do MARE é ajustada para que proporcione uma diferença de fase entre a onda refletida frontalmente (R_f) e as ondas refletidas posteriormente (R_p), em 180° , proporcionando o cancelamento mútuo dessas ondas. Essa espessura é denominada espessura elétrica, pois sua dimensão não corresponde exatamente a $\frac{1}{4}$ do comprimento da onda incidente. A diferença entre a espessura física e a espessura elétrica é devida às propriedades elétricas e/ou magnéticas do MARE e à diferença entre a impedância do meio externo e a impedância do MARE, que provoca refração da onda em seu interior. A energia da onda que sofre múltiplas reflexões internas é absorvida pelos centros absorvedores presentes no MARE (LEE, 1991).

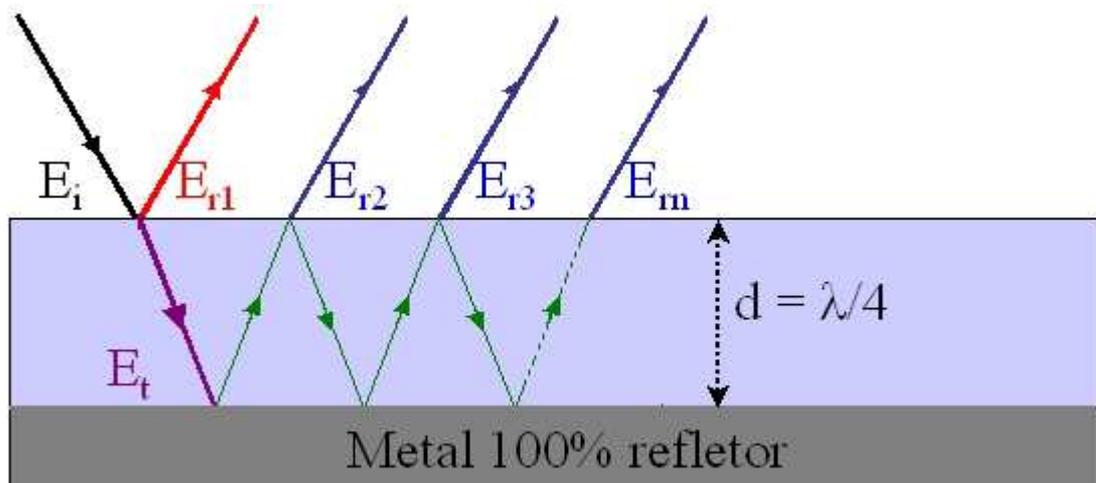


Figura 9. Esquema de reflexão de onda em um MARE (■) posicionado sobre um metal 100% refletor (■) – ■ onda incidente (E_i), ■ reflexão frontal (E_{r1}), ■ reflexão posterior (E_{r2} , E_{r3} , ..., E_{rn}), ■ transmissão na interface meio externo/MARE (E_t), ■ múltiplas reflexões internas no MARE

A influência dessa espessura elétrica no coeficiente de reflexão e nas propriedades eletromagnéticas dos MARE tem sido descrita superficialmente em

diversas literaturas (YUSOFF, 2002; GIANNAKOPOULOU, 2003; MAOSHENG, 2003a), sem, no entanto, fornecer detalhes sobre a constituição do material, os parâmetros E_a , E_r e E_t e a sua relação com a atenuação com uma placa metálica sob o MARE.

2.4 Tipos de MARE

Os absorvedores de microondas podem se dividir em duas categorias gerais: aqueles que absorvem as microondas que se propagam no espaço aberto, e os que absorvem as ondas dentro de guias de onda, linhas coaxiais e outros ambientes fechados, tais como cavidades ressonantes (JOHNSON, 1992; GEAR, 2004).

2.4.1 Absorvedores de microondas ressonantes ou sintonizados

Os absorvedores de microondas sintonizados ou ressonantes são projetados para operar a uma frequência específica e proporcionar uma absorção de -20 dB (99% absorvido) da energia da onda incidente em uma determinada frequência (GEAR, 2004). Sua espessura é ajustada para a faixa de frequência de onda que se pretende absorver.

Os absorvedores ressonantes ou sintonizados normalmente exibem altas perdas magnéticas e dielétricas e são projetados levando-se em conta a espessura elétrica do MARE, na frequência desejada. Estes absorvedores necessitam de um material condutor de eletricidade sob os MARE, que é conseqüentemente 100% refletor, para atingir o cancelamento da onda eletromagnética refletida na parte frontal com a onda eletromagnética refletida na parte posterior. A sua aplicação considera que as fases destas duas ondas estão com uma diferença o mais próximo possível de 180° , o que resulta no cancelamento quase completo destas duas reflexões.

São conhecidos alguns materiais absorvedores de radiação eletromagnética sintonizados feitos com matriz de silicone (Figura 10), que tem espessuras variando desde 0,76 mm em torno de 30 GHz, até 4,06 mm em torno de 1,0 GHz (GEAR, 2004). Esses tipos de MARE são muito utilizados para atenuar correntes de superfície, podendo ser utilizados também em cavidades ressonantes. A Figura 11 mostra um MARE sintonizado utilizado em aparelho de telefonia móvel celular.



Figura 10. MARE do tipo manta flexível (R&F PRODUCTS, 2005)

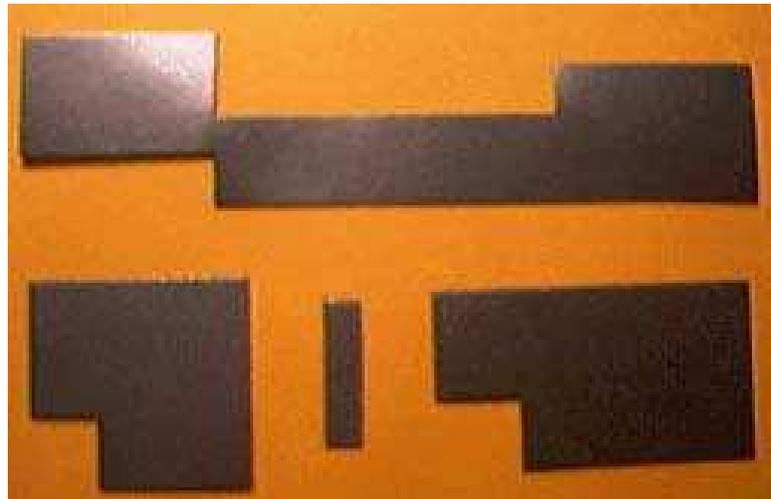


Figura 11. MARE sintonizado utilizado em aparelhos de telefonia móvel celular (PERSEUS ,2005)

2.4.2 Absorvedores de cavidades ressonantes

São materiais que têm alta permeabilidade e são aplicados na maioria das vezes em cavidades e módulos de microondas (Figura 12). Gear, 2004, relatou a correção de interferência de radiofrequência dentro de um módulo de um conjunto faseado usado na transmissão e recepção de sinais de radar na banda X, pela aplicação de um absorvedor de cavidade ressonante de 0,76 mm de espessura com capacidade de atenuação de 36 dB/cm.

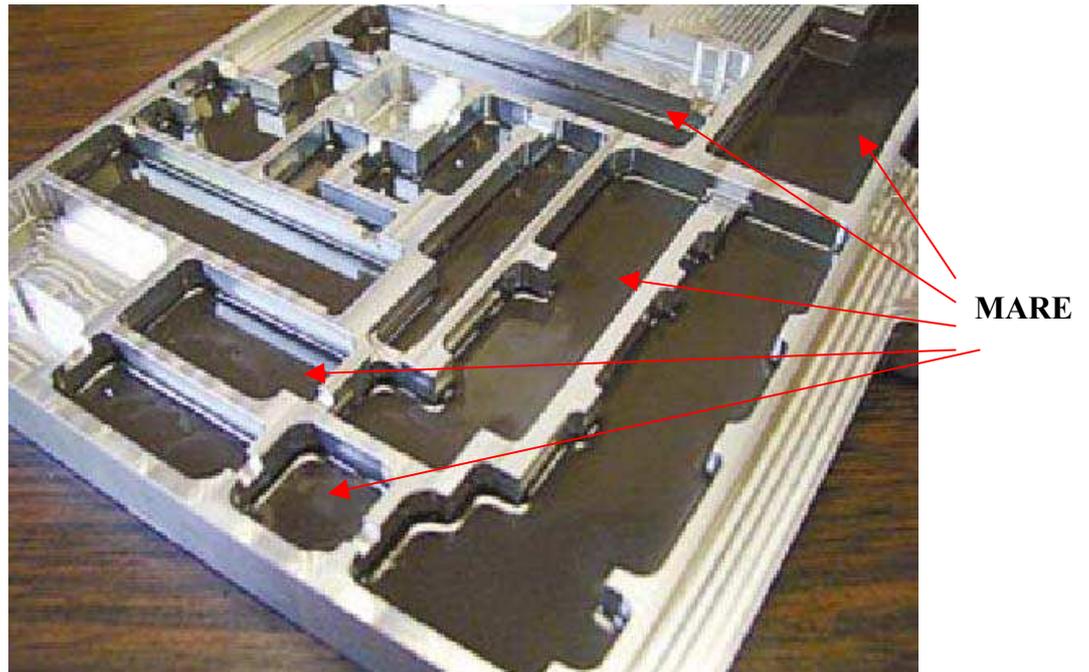


Figura 12. Absorvedor de cavidade ressonante (DIXON, 2004)

Um esquema de aplicação de MARE em uma cavidade com circuito de microondas ressonante é apresentado na Figura 13.

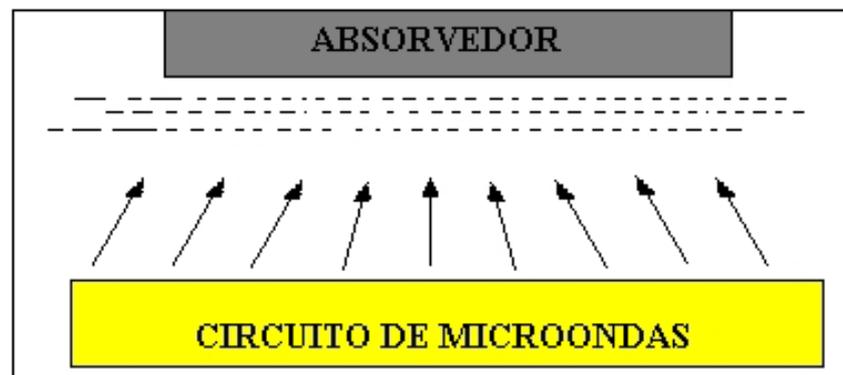


Figura 13. Esquema de aplicação de MARE em cavidades ressonantes

2.4.3 Absorvedores de microondas em espaço livre

Esses absorvedores são projetados para operar em condição de espaço livre, ou seja, para absorver ondas propagantes. A Figura 14 ilustra um tipo de absorvedor de microondas em espaço livre, fabricado em espuma e em formato piramidal. Esses são classificados como materiais de alto desempenho, com absorção da ordem de -40 dB (99,99%) a -50 dB (99,999%). Sua impedância, na superfície, é próxima de 377Ω , bem

próxima da impedância do espaço livre e são usados em câmaras anecóicas (Figura 15) e outros tipos de ambientes fechados para medição de microondas (GEAR, 2004).



Figura 14. Absorvedor de microondas em espaço livre (PERSEUS, 2005b)



Figura 15. Câmara anecóica com absorvedores de microondas em espaço livre (AIRPOWER, 2005)

2.4.4 Absorvedores de carga

Os absorvedores de carga são normalmente rígidos pois são obtidos utilizando-se resina epóxi como matriz de dispersão. São utilizados quando a temperatura de trabalho é mais elevada (até 177°C). Os centros absorvedores utilizados são ferritas e tem sua utilização quando se necessita de absorção de alta eficiência na faixa de 8 a 18 GHz (GEAR, 2004).

2.5 Composição dos MARE

Os materiais absorvedores de radiação eletromagnética são obtidos a partir da dispersão do material que fornece os centros absorvedores, em uma matriz polimérica. Os centros absorvedores podem ser dos tipos dielétrico ou magnético.

2.5.1 Aditivos dielétricos

Um aditivo muito utilizado como centro absorvedor de MARE dielétricos é o negro de fumo, devido à sua alta área superficial e alta condutividade elétrica. Além disso, seu alto grau de pureza química garante a isenção de íons metálicos nos MARE, cuja presença o tornaria, eventualmente, um refletor da radiação eletromagnética (NOHARA, 2003).

O desenvolvimento de MARE, baseados em aditivos dielétricos é atualmente realizado com enfoque à melhoria da absorção de energia eletromagnética de um recobrimento com um aumento das perdas dielétricas dos materiais (com altos valores da componente imaginária da permissividade ϵ'') (GORSHENEV, 1997). A Figura 16 mostra a variação das componentes real e imaginária da permissividade com a frequência, para um determinado tipo de negro de fumo (NALWA, 1997).

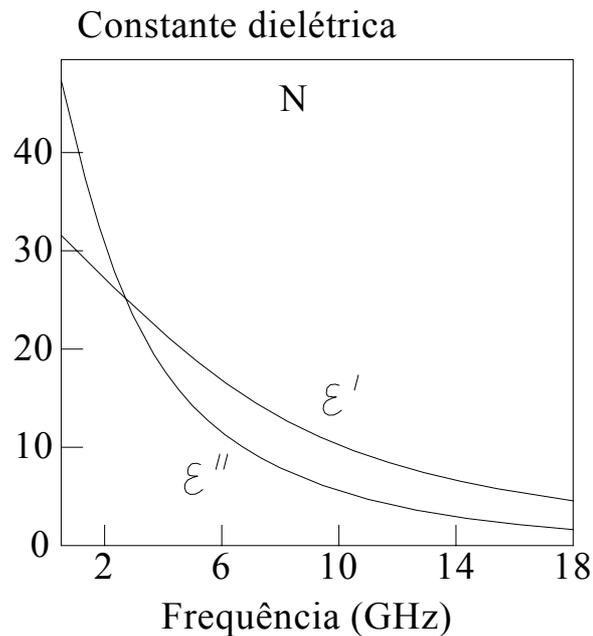


Figura 16. Variação da permissividade do negro de fumo com a frequência (NALWA, 1997)

Os materiais absorvedores dielétricos utilizam como matriz, diferentes tipos de polímeros, tais como resinas epóxi, fenólica, bismaleimida, poliuretanos, poliimidas, silicone, podendo estes ser polímeros rígidos ou flexíveis, nas formas de mantas ou espumas (LEE, 1991; CHO, 1996).

2.5.2 Aditivos magnéticos

Nos MARE magnéticos, os materiais mais utilizados como centros absorvedores são as ferritas (CHO, 1996), principalmente aquelas substituídas por metais divalentes, tais como níquel (Ni), manganês (Mn), zinco (Zn), cobre (Cu) e cobalto (Co). As matrizes poliméricas são formadas por vários tipos de polímeros, tanto termoplásticos como termorrígidos, tais como silicone, borrachas, epóxi, poliuretanos, polietileno, etc. A relação entre as quantidades de ferritas e a matriz polimérica é bastante variada, podendo alcançar teores de ferritas da ordem de até 80% em massa, ou mais (CHO, 1996). A quantidade de ferrita depende do nível de absorção e da frequência de trabalho que se deseja para o MARE.

2.5.2.1 Ferritas

As ferritas podem ser classificadas conforme sua estrutura cristalina como do tipo granadas, hexagonais ou espinélio. As granadas têm fórmula geral $5\text{Fe}_2\text{O}_3:3\text{Me}_2\text{O}_3$, onde Me_2O_3 é um óxido metálico de terras raras. As hexagonais têm fórmula geral $6\text{Fe}_2\text{O}_3:1\text{MeO}$, onde MeO é um óxido de metal divalente pertencente ao grupo II-A da tabela periódica dos elementos. Os espinélios têm fórmula geral $1\text{Fe}_2\text{O}_3:1\text{MeO}$, onde MeO é um óxido de metal de transição. A célula unitária da estrutura do espinélio é apresentada na Figura 17 (SOOHOO, 1960).

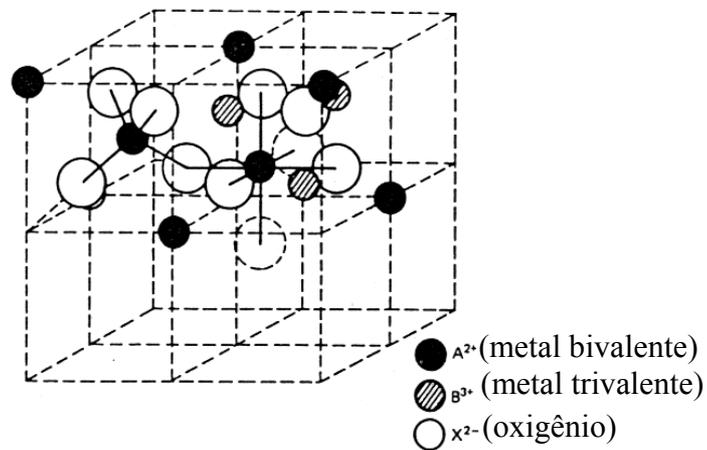
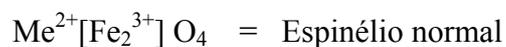
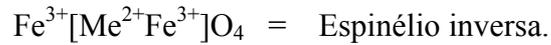


Figura 17. Célula unitária da estrutura espinélio (SOOHOO, 1960)

O óxido de metal de transição (MeO) nas ferritas com estrutura espinélio é formado com metais de transição bivalentes como Mn, Ni, Co, Zn, Fe, Mg e Cu. Essas ferritas se cristalizam com 8 átomos por célula unitária, como pode ser observado na Figura (17), sendo ferrimagnéticas. Essa estrutura cristalina oferece diversas combinações possíveis de cátions que poderão balancear as cargas -8 dos íons de oxigênio. Para definir a localização dos cátions nas redes octaédricas e tetraédricas deve-se seguir a seguinte convenção (BALANIS, 1997):



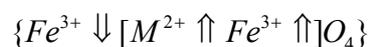
O íon ferro pode ocupar, ainda, as redes tetraédrica e octaédrica, dependendo do outro cátion presente, e isto pode resultar na estrutura:



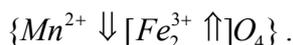
Em função dessas características e da disponibilidade no mercado, as ferritas tipo espinélio são muito utilizadas como aditivos no processamento de MARE, em materiais absorvedores à base de polímeros, como tintas, borrachas e espumas, para faixas de frequências estreitas e largas (UFIMTSEV, 1996).

A ferrita mais frequentemente usada na absorção de microondas na faixa de 3-30 GHz é o grupo dos espinélios (CHO, 1996). A estrutura cristalina dos espinélios é isomorfa como a do mineral $\text{Mg}^{2+}\text{Al}_2^{3+}\text{O}_4^{2-}$. Quando o Al^{3+} é substituído por Fe^{3+} , a ferrita de magnésio é formada ($\text{Mg}^{2+}\text{Fe}_2^{3+}\text{O}_4^{2-}$). Praticamente qualquer íon metálico divalente (Ni, Mn, Cu, etc.) pode ser o substituto para formar uma ferrita espinélio. A célula unitária cúbica contém oito unidades de fórmula, com 16 cátions M_1^{3+} e 8 cátions M_2^{2+} . Em um espinélio normal os 8 cátions M_2^{2+} ocupam os 8 sítios A tetraédricos, e os 16 cátions M_1^{3+} ocupam os 16 sítios B octaédricos. No espinélio invertido, 8 dos 16 cátions M_1^{3+} ocupam todos os sítios tetraédricos.

Para entender as propriedades magnéticas das ferritas deve-se considerar o modelo de Néel de ferrimagnetismo (LAX, 1962). Existem três interações de supertroca: A-A, B-B e A-B. Todas essas interações são negativas, isto é, antiferromagnéticas, sendo a mais forte delas a interação A-B, que explica as duas sub-redes alinhadas antiparalelas uma a cada outra, isto é, antiferromagneticamente. Na estrutura do espinélio invertido, oito íons magnéticos M_2^{3+} na sub-rede A cancela o magnetismo de oito íons M_2^{3+} na sub-rede B. O momento ferrimagnético observado é devido aos spins não compensados dos 8 cátions M_2^{2+} remanescentes. Nos espinélios invertidos, a distribuição dos íons é:



Nos espinélios normais, o momento magnético líquido é representado como:



Nas ferritas, a permissividade e a permeabilidade variam conforme a frequência. Para ferritas policristalinas, a permissividade é geralmente atribuída aos espaços entre as cargas nas bordas dos grãos, enquanto a permeabilidade está relacionada aos mecanismos magnetizantes: as rotações dos spins e o tamanho dos domínios magnéticos, ou seja, o tamanho da partícula. Existem alguns estudos já realizados sobre a permeabilidade e a permissividade das ferritas policristalinas (SNOEK, 1948; POLDER, 1953; NAKAMURA, 1994).

A Tabela 1 relaciona valores de permissividade, permeabilidade e tangente de perda de ferritas tipo espinélio típicas, tratadas à temperatura máxima de 1300°C. Esses valores foram obtidos em frequência de 4,5 GHz (AULOCK, 1965). A análise desta tabela mostra que os valores apresentados variam em função dos átomos presentes na ferrita como, também com a estequiometria dos elementos químicos.

Tabela 1 – Valores de permissividade (ϵ'), permeabilidade (μ') e tangente de perda ($\text{tg}\delta$) de ferritas espinélio típicas, tratadas à temperatura máxima de 1300°C, obtidos a 4,5 GHz (AULOCK, 1965).

Parâmetros	MgFe ₂ O ₄	MnFe ₂ O ₄	Mn _{1,42} Fe _{1,58} O ₄	NiFe ₂ O ₄	Ni _{0,5} Zn _{0,5} Fe ₂ O ₄
ϵ'	9,66	9,30	--	13,40	20,0
ϵ''	0,17	0,48	--	3,52	7,0
Tg δ	0,018	0,051	--	0,26	0,35
μ'	0,80	- 0,31	- 1,0	0,26	- 0,50
μ''	0,97	2,04	4,0	3,46	6,0

Os domínios magnéticos das ferritas são regiões onde seus momentos magnéticos atômicos se alinham quando elas são expostas a um campo magnético externo (LAX, 1962). Os materiais ferrimagnéticos, como as ferritas, podem exibir momentos magnéticos, desde que seus domínios magnéticos estejam presentes. Nohara, 2003, relacionou o tamanho de partícula de uma ferrita de MnZn com a presença de picos ferrimagnéticos em espectros obtidos por espectroscopia Mössbauer.

A espectroscopia Mössbauer é uma técnica que pode ser utilizada para obter informações sobre as propriedades magnéticas da matéria, entre outras informações, nas

áreas da física, química, biologia e metalurgia. Essa técnica é baseada no “Efeito Mössbauer”, descoberto em 1957 por Rudolph Mössbauer, que recebeu o Prêmio Nobel em Física em 1961 pelo seu trabalho (MÖSSBAUER, 1958).

A Figura 18 mostra o espectro Mössbauer do ferro puro (BURGOV, SKLYAREVSKI, 1969), identificando os picos paramagnéticos e ferromagnéticos do material, e a Figura 19 mostra o espectro Mössbauer da ferrita de MnZn com tamanho de partícula $\phi < 0,2 \mu\text{m}$ (NOHARA, 2003). Comparando-se a Figura 18 com a Figura 19, verifica-se que no espectro da ferrita com tamanho de partícula $\phi < 0,2 \mu\text{m}$ só aparecem as bandas relativas ao caráter paramagnético, denotando uma característica de um material não absorvedor de microondas o que, segundo Nohara, 2003, se deve ao fato dos domínios ferrimagnéticos do material terem sido destruídos na moagem. No mesmo trabalho, Nohara também apresenta os espectros Mössbauer para outras duas ferritas de MnZn, sendo uma delas com tamanho de partícula $2 \mu\text{m} < \phi < 10 \mu\text{m}$ (Figura 20) e a outra com tamanho de partícula $\phi > 200 \mu\text{m}$ (Figura 21), onde, em ambos os casos, podem ser verificados os picos característicos de materiais ferrimagnéticos, conforme identificação na Figura 21.

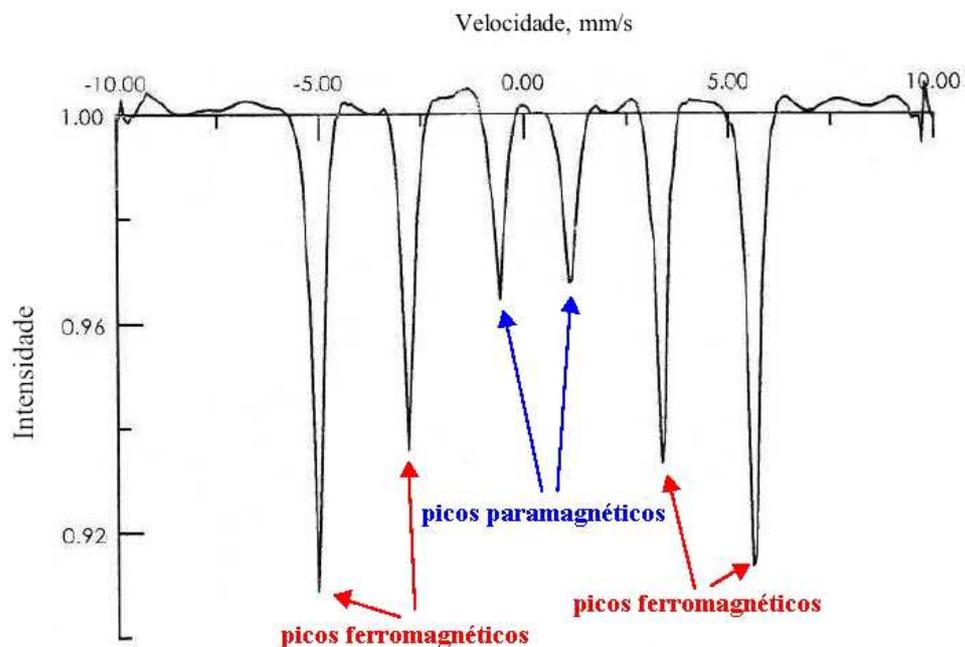


Figura 18. Espectro Mössbauer do ferro puro (BURGOV, SKLYAREVSKI, 1969)

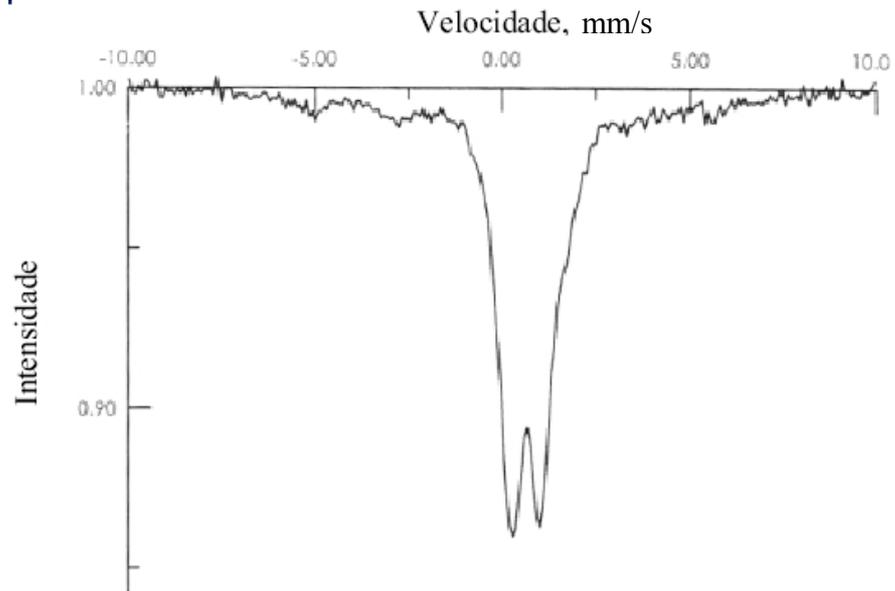


Figura 19. Espectro Mössbauer da ferrita de MnZn com tamanho de partícula $\phi < 0,2\mu\text{m}$ (NOHARA, 2003)

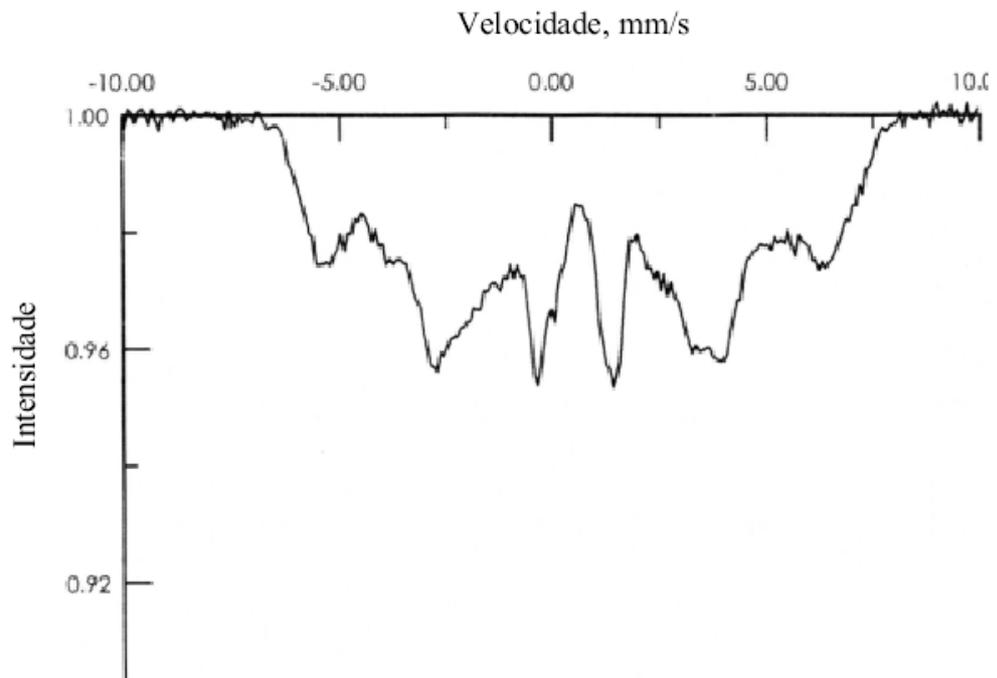


Figura 20. Espectro Mössbauer da ferrita de MnZn com tamanho de partícula $0,2\mu\text{m} < \phi < 10\mu\text{m}$ (NOHARA, 2003)

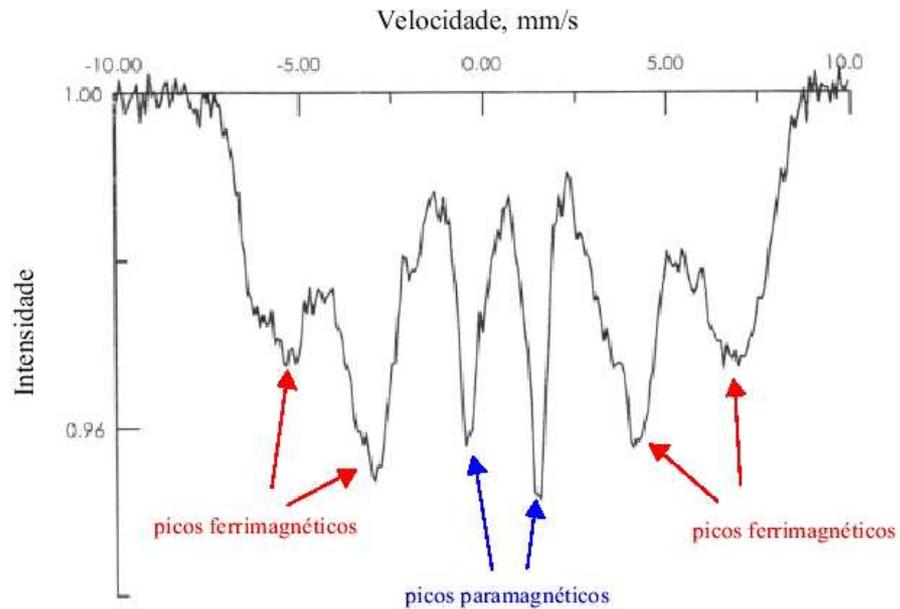


Figura 21. Espectro Mössbauer da ferrita de MnZn com tamanho de partícula $\phi > 200\mu\text{m}$ (NOHARA, 2003)

Quando se compara os espectros das Figuras 20 e 21, verifica-se que, apesar de ambos os espectros apresentarem os picos ferrimagnéticos, seus perfis são diferentes. Na análise dos espectros, Nohara afirma que essa diferença se refere a mudanças nos níveis de energia da ferrita, os quais são alterados em função da moagem, repercutindo no comportamento da ferrita em termos de absorção na faixa de microondas (Figura 22).

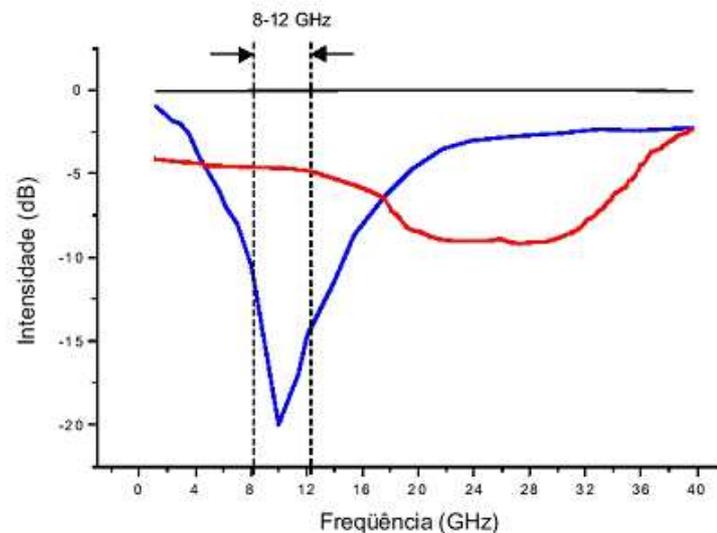


Figura 22. Curva de absorção de MARE, de 2- 40 GHz, com diferentes distribuições de tamanho de partícula. Curva em azul: $\phi > 200\mu\text{m}$; curva em vermelho: $0,2\mu\text{m} < \phi < 10\mu\text{m}$ (NOHARA, 2003)

2.5.3 Matrizes

Como matriz polimérica no processamento de MARE para dispersão das partículas absorvedoras de radiação, por exemplo, as ferritas e o negro de fumo são utilizados vários tipos de materiais (LEE, 1991; LIU, 1995; CHO, 1996; CABOT, 1998;). A escolha da matriz polimérica depende do tipo da aplicação, podendo ser epóxi, silicones, poliuretanos (PU), entre outras. Os PU são muito empregados na indústria aeronáutica por possuírem propriedades adequadas a este setor, como maior resistência à erosão, resistência a altas temperaturas de serviço, resistências físico-química e mecânica em gradientes de temperatura na faixa de -70°C a 150°C , e quando aditados com ferritas e negro de fumo, há a possibilidade de atuarem como materiais absorvedores de radiação eletromagnética em determinadas faixas de frequências (LEE, 1991; AIYAR, 1999). Cho, S. B. et al, (1996), utilizou a borracha de silicone como matriz de dispersão tanto de ferritas NiZn como também de NiZn substituídas parcialmente por Co.

A escolha da matriz polimérica que será usada na preparação de um material absorvedor de radiação eletromagnética é muito importante para a eficiência do material, não devendo ter uma constante dielétrica muito superior à unidade (LEE, 1991). Desta maneira o MARE não terá uma impedância muito diferente da impedância do meio-ambiente, permitindo que a onda eletromagnética penetre no material. Após ter penetrado, esta onda sofrerá múltiplas reflexões nos sítios da ferrita que estão dispersos no MARE, alcançando-se, assim, a máxima absorção da onda eletromagnética. Por outro lado, uma quantidade insuficiente de ferrita no MARE provocará uma reflexão ao meio externo de uma quantidade de microondas antes de ser absorvida, que será responsável pela baixa eficiência do MARE.

A Tabela 2 relaciona algumas propriedades típicas de matrizes poliméricas empregadas no setor aeroespacial (LEE, 1991).

Tabela 2 – Propriedades elétricas típicas de matrizes poliméricas (LEE, 1991).

Matriz Polimérica	Constante Dielétrica, ϵ'/ϵ_0^*	Fator de Perda, $\text{tg } \delta$
Resinas utilizadas em compósitos convencionais		
Poliéster	2,7- 3,2	0,005-0,020
Epóxi	3,0-3,4	0,010-0,030
Cianoéster	2,7-3,2	0,004-0,010
Polímeros utilizados em compósitos para altas temperaturas		
Fenólicas	3,1-3,5	0,030-0,037
Poliimidas	2,7-3,2	0,005-0,008
Silicone	2,8-2,9	0,002-0,006
Polieterimida (PEI)	3,1	0,004
2.6 Polímeros utilizados em compósitos termoplásticos		
Policarbonato (LEXAN®) (G.E.)	2,5	0,0006
Polipropileno (NORYL®) (G.E.)	2,6	0,0009
Polisulfona	3,1	0,003
Polietersulfona	3,5	0,003
Polisulfeto de fenileno	3,0	0,002
Poliuretano (PU)	2,0	0,002
Teflon® (Du Pont)	2,1	0,0004

Dados para frequências de 10 GHz a 20°C, ϵ_0^* é a constante dielétrica no vácuo, ϵ' é a componente real da permissividade do material.

3 Materiais e métodos

O trabalho experimental consistiu de uma seqüência de atividades, que incluiu:

- a) Seleção das ferritas de MnZn com tamanhos de partículas diferenciados.
- b) Seleção da ferrita de Ba.
- c) Corte de um guia de onda para servir de molde para os corpos-de-prova.
- d) Escolha das relações mássicas ferrita:resina a serem estudadas.
- e) A preparação dos corpos-de-prova com a dispersão das ferritas na resina e moldagem.
- f) Retificação nas dimensões dos corpos-de-prova.
- g) Montagem e calibração do guia de onda utilizado na determinação dos parâmetros $E_{r-livre}$ (energia refletida), E_t (energia transmitida) e E_a (energia absorvida) esquematizados na Figura 3, e $E_{r-placa}$ (energia refletida), como esquematizada na Figura 4, das formulações de ferritas estudadas.

3.1 Materiais utilizados na preparação do MARE

Os corpos-de-prova para o ensaio de guia de onda foram preparados com os seguintes materiais e equipamentos:

- a) Resina epóxi bicomponente, tipo araldite profissional.
- b) Ferrita do tipo manganês/zinco com os seguintes tamanhos de partículas: $\phi < 38\mu\text{m}$, $38\mu\text{m} < \phi < 75\mu\text{m}$ e $75\mu\text{m} < \phi < 150\mu\text{m}$.
- c) Ferrita de Ba, com tamanho de partícula $\phi < 38\mu\text{m}$.
- d) Guias de onda com dimensões de 23mm X 11mm, específicos para frequências na banda X (8-12GHz) cortados para servir de moldes para os corpos-de-prova.
- e) Desmoldante de uso aeronáutico, da empresa Airtech.
- f) Retífica com disco diamantado, com precisão de 0,005 mm.

Os corpos-de-prova foram preparados utilizando-se a resina epóxi como substrato, aditadas com diferentes concentrações de ferritas de MnZn e de Ba, nas proporções de 1:10, isto é, uma concentração de 1 parte de ferrita em 10+1 (11) partes do compósito final, perfazendo um total de 9,1% em massa de ferrita, e proporções de 2:10 (17,7%), 3:10 (23,1%), 4:10 (28,5%), 5:10 (33,3%), 6:10 (37,5%) e 7:10 (41,1%). A Figura 23 apresenta a as relações mássicas ferrita:resina com a % massa de ferrita nos corpos-de-prova.

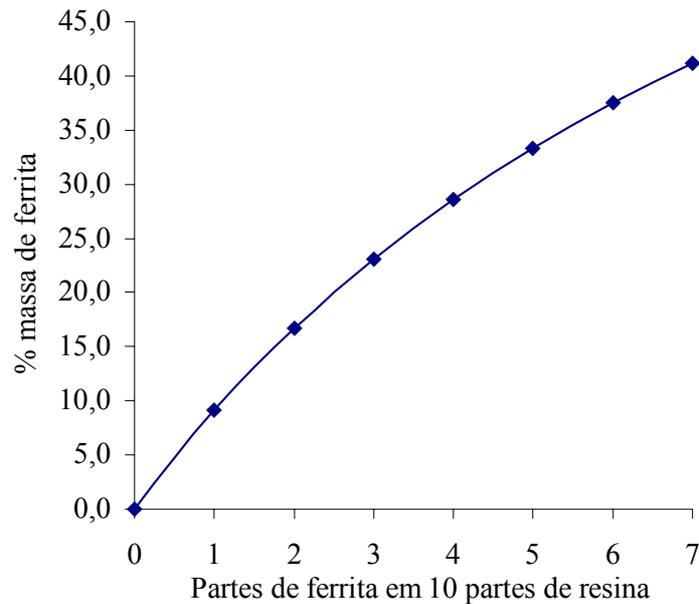


Figura 23. Relação entre as relações mássicas ferrita:resina com a % em massa de ferrita, nos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova com ferrita de manganês/zinco foram preparados com 4 diferentes tamanhos de partícula: $\phi < 38\mu\text{m}$, $38\mu\text{m} < \phi < 75\mu\text{m}$ e $75\mu\text{m} < \phi < 150\mu\text{m}$, sendo que o quarto conjunto de corpos-de-prova foi preparado com partes iguais em massa dos três tamanhos de partícula aqui mencionados. Os corpos-de-prova com ferrita de Ba foram preparados com apenas um tamanho de partícula $\phi < 38\mu\text{m}$. Assim, foi preparado um total de 35 corpos-de-prova, sendo 7 concentrações de ferrita para cada tamanho de partícula.

A mistura da ferrita com a resina epóxi foi realizada em um recipiente descartável de poliestireno, seguido pela homogeneização por agitação mecânica por 1 minuto e repouso por 10 minutos para eliminação de bolhas geradas no processo de mistura, antes de verter a mistura no molde. Esse molde foi preparado com um guia de onda de precisão, serrado em pedaços de $23 \times 11 \times 5\text{ mm}$, sendo que previamente foi aplicado desmoldante. O material foi curado à temperatura ambiente por 24 horas. Para garantir a mesma espessura e o mesmo acabamento superficial em todos os corpos-de-prova analisados, os mesmos foram retificados com um disco diamantado, obtendo-se uma precisão de $0,005\text{ mm}$ na espessura. A espessura de todos os corpos-de-prova foi fixada em $3,0\text{ mm}$, em função do ferramental de fixação do corpo-de-prova disponível

na retífica. Para a obtenção de valores menores de espessura é necessário preparar novos suportes. A Figura 24 mostra a fotografia de um corpo-de-prova sendo retificado (indicado pela seta).

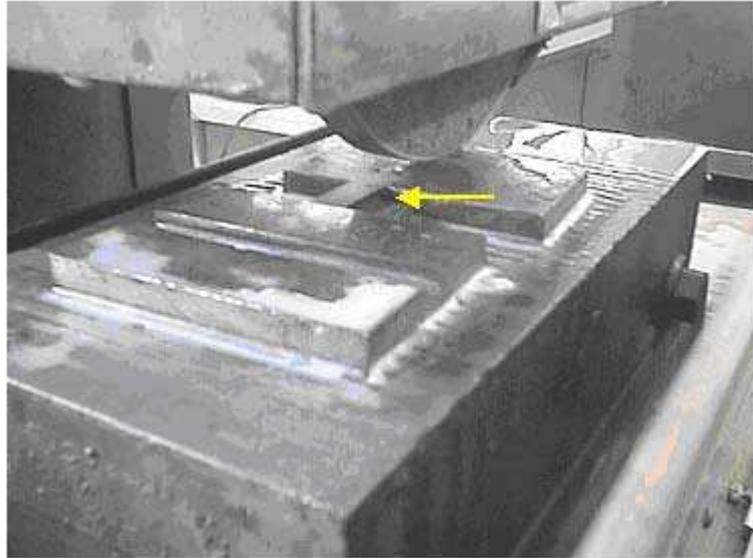


Figura 24. Retificação dos corpos-de-prova epóxi/ferrita para ensaio no guia de onda

3.2 Métodos e equipamentos usados na caracterização dos corpos-de-prova

A metodologia adotada no Laboratório de Caracterização Eletromagnética da Divisão de Materiais do CTA para as medidas por guia de onda utiliza um acoplador direcional, na faixa de frequências compreendida entre 8-12 GHz. O acoplador direcional utilizado é uma peça de alta precisão mecânica, e constituído de 2 guias de onda acoplados, sendo um deles reto e o outro curvo, com 3 terminais idênticos. Os detalhes do acoplador podem ser verificados na Figura 25.

O acoplador direcional foi projetado para a onda eletromagnética percorrê-lo da seguinte forma: A fonte de microondas é conectada no terminal A, onde percorre o guia de onda até atingir o terminal B. A onda eletromagnética que percorre o sentido A→B do guia de onda não chega até o terminal C. A amostra em estudo é posicionada no terminal B, com dimensões de 23 mm x 11mm (8-12 GHz), utilizando um suporte construído com as dimensões exatas do acoplador direcional. O suporte para a amostra pode ser visto na Figura 26, primeiramente sem a amostra e em seguida com a amostra posicionada.

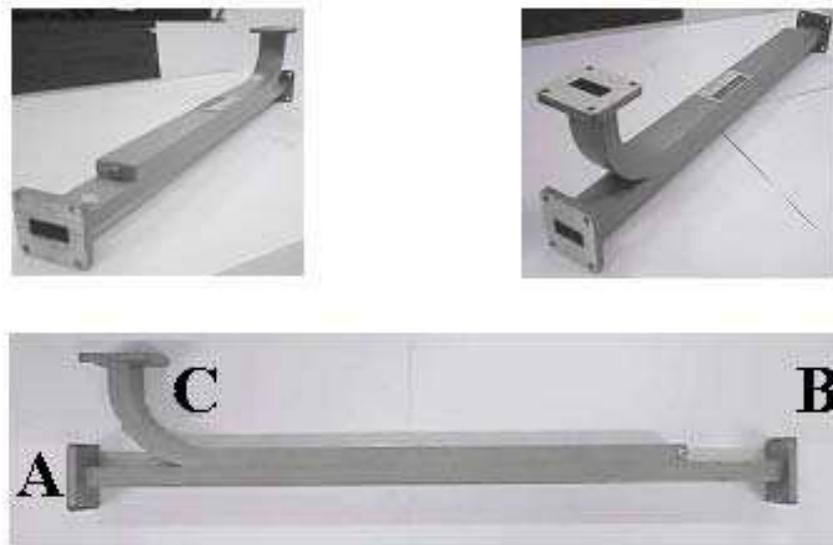


Figura 25. Acoplador direcional utilizado para medidas em guia de onda (8-12 GHz)



Figura 26. Suporte das amostras no sistema de guia de onda (8 – 12 GHz). (a) amostra não encaixada no suporte. (b) amostra encaixada no suporte

O coeficiente de reflexão foi medido em duas situações diferentes: em uma delas as amostras foram montadas conforme o esquema da Figura 3 e na outra situação as amostras foram montadas conforme o esquema da Figura 4, sendo que na primeira configuração também foi medido o coeficiente de transmissão. Na primeira configuração (Figura 3) é avaliada a capacidade de absorção proporcionada pela adição de material ferrimagnético à matriz de resina epóxi. Na segunda configuração (Figura 4), onde é colocada uma placa metálica posterior ao corpo-de-prova de MARE, o que se avalia é a capacidade do material em reduzir o coeficiente de reflexão de um material 100% refletor.

Os equipamentos necessários para a realização do trabalho são apresentados a seguir, envolvendo as infra-estruturas disponíveis na Divisão de Materiais/IAE, localizadas no Centro Técnico Aeroespacial:

- a) Gerador de sinais RF modelo HP 83630B (Hewlett Packard).
- b) Analisador de espectro modelo HP 8593E (Hewlett Packard).
- c) Acoplador direcional modelo X752C (Hewlett Packard), de 8-13 GHz (banda X).
- d) Adaptadores e cabos coaxiais de baixas perdas da *Huber-Suhner* enterprise, modelo Sucoform SM-141-PE (50Ω).
- e) Computador PC com interface GPIB.

A Figura 27 mostra o esquema de ligação do acoplador direcional para medir a energia refletida pela amostra (E_r), tanto para a configuração da Figura 3 ($E_{r-livre}$), quanto para a configuração da Figura 4 ($E_{r-placa}$). O gerador de sinais é ligado por um cabo no adaptador coaxial no terminal A, e o analisador de espectro é ligado por um cabo no adaptador coaxial do terminal C. O porta-amostra é posicionado no terminal B. Para a configuração esquematizada na Figura 4, é colocada uma placa metálica após o porta-amostra, e para a configuração esquematizada na Figura 3, é colocado um absorvedor de carga no lugar da placa metálica, de modo a absorver totalmente a energia transmitida (E_t) pela amostra.

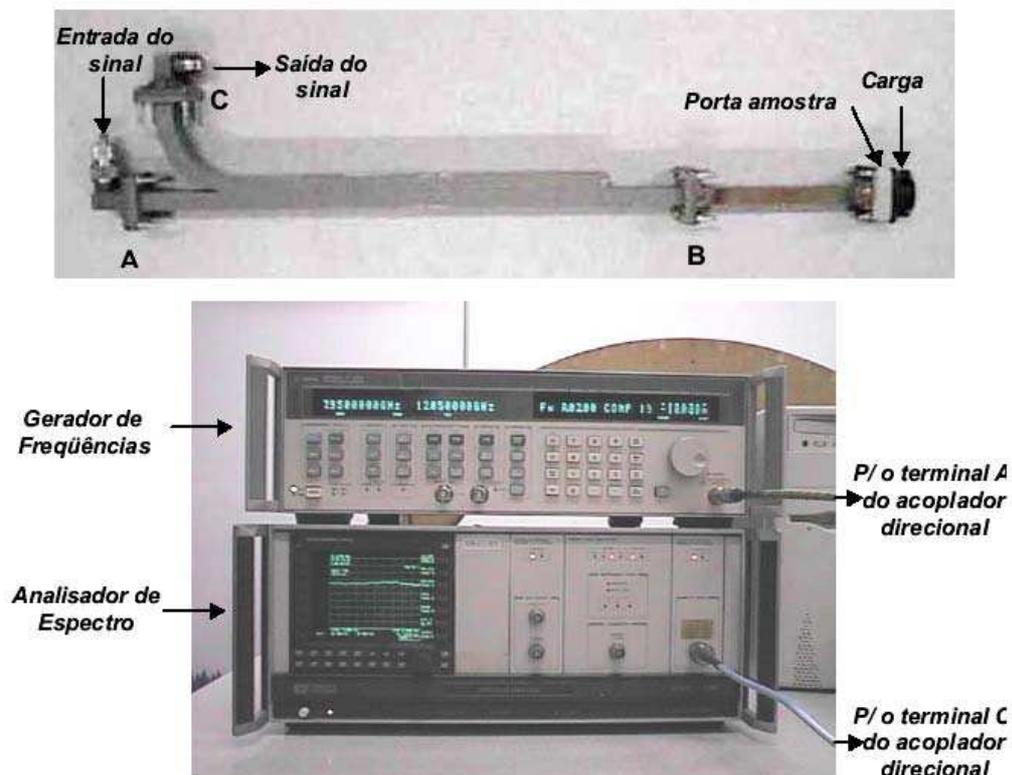


Figura 27. Esquema de ligação do guia de onda para determinação da energia refletida pela amostra ($E_{r-livre}$)

Um prolongamento de guia de onda é colocado entre o porta-amostra e o acoplador direcional, uma vez que a conexão do porta-amostra diretamente no acoplador pode gerar interferências nas medidas. Assim, a onda eletromagnética gerada em A atinge a amostra; a energia refletida pela amostra é detectada em C e lida no analisador de espectro (E_r).

A Figura 28 relaciona o esquema de ligação do acoplador direcional para medir a energia transmitida pela amostra (E_t), que é feita apenas na configuração esquematizada na Figura 3. A diferença em relação ao esquema de ligação da Figura 27 é a colocação de um absorvedor de carga no terminal C do acoplador direcional, bem como o posicionamento do detector atrás do suporte para a amostra. Assim, a onda eletromagnética gerada em A atinge a amostra e a energia refletida é absorvida pelo absorvedor de carga localizado no terminal C, garantindo que o sinal refletido não volte ao guia de onda reto, o que causaria interferência nas medidas. A energia transmitida (E_t) é detectada pelo analisador de espectro, através do detector instalado atrás do suporte para a amostra.

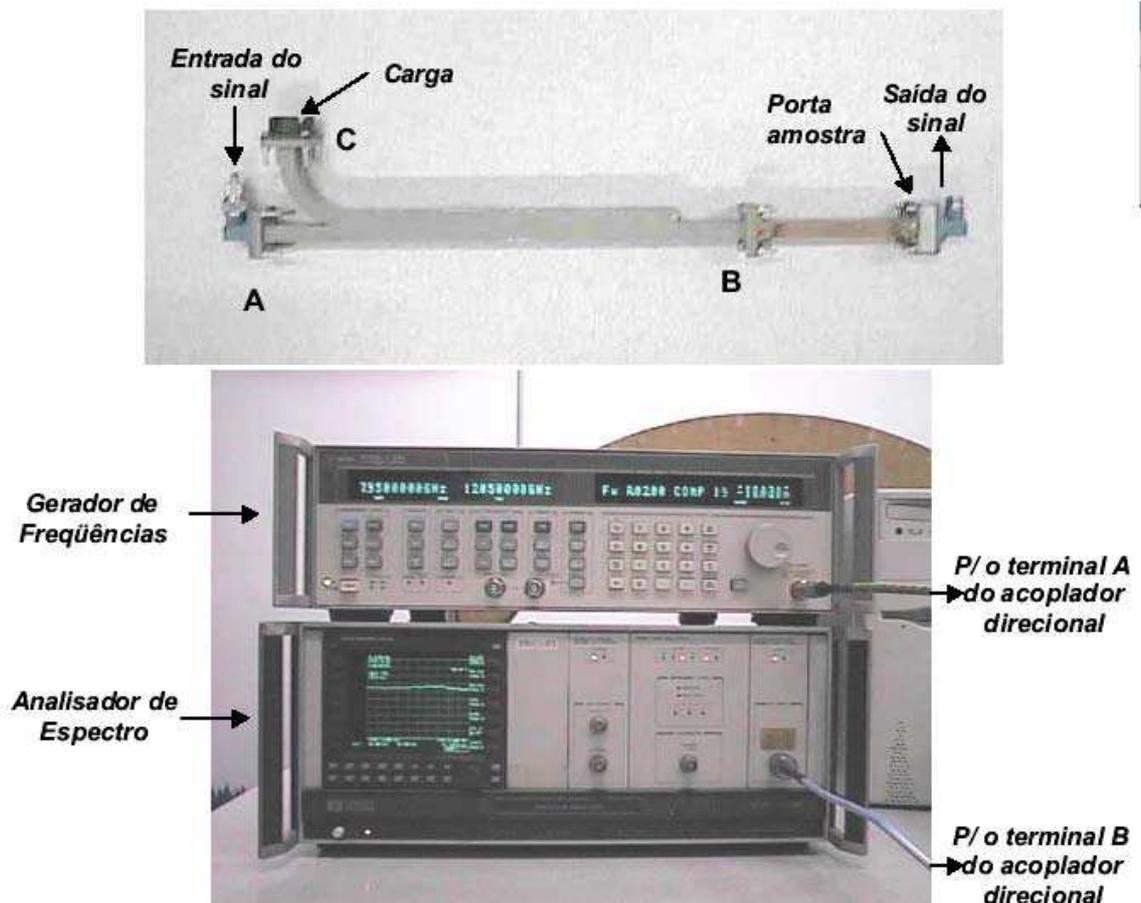


Figura 28. Esquema de ligação do guia de onda para determinação da energia transmitida pela amostra (E_t)

4 Resultados e discussão

A seguir são apresentados os resultados obtidos com os corpos-de-prova caracterizados por medidas em guia de onda, constituídos de resina epóxi e ferritas de MnZn e ferritas de Ba em diferentes concentrações e tamanhos de partícula.

4.1 Resina Epóxi

Primeiramente foram determinados os parâmetros $E_{r-livre}$, E_t e E_a da resina epóxi pura, conforme o esquema da Figura 3, com o objetivo de comparar os resultados obtidos com a resina epóxi aditada com ferrita.

4.1.1 Energia refletida ($E_{r-livre}$)

O gráfico da Figura 29 mostra a medida da energia refletida ($E_{r-livre}$) da resina epóxi pura, de 8 a 12 GHz. A linha reta perpendicular a zero no eixo da Atenuação (dB), é a referência, isto é, uma placa metálica – material 100% refletor. Assim, se o valor medido da energia refletida de um material estiver próximo da referência, maior é o seu caráter refletor e vice-versa.

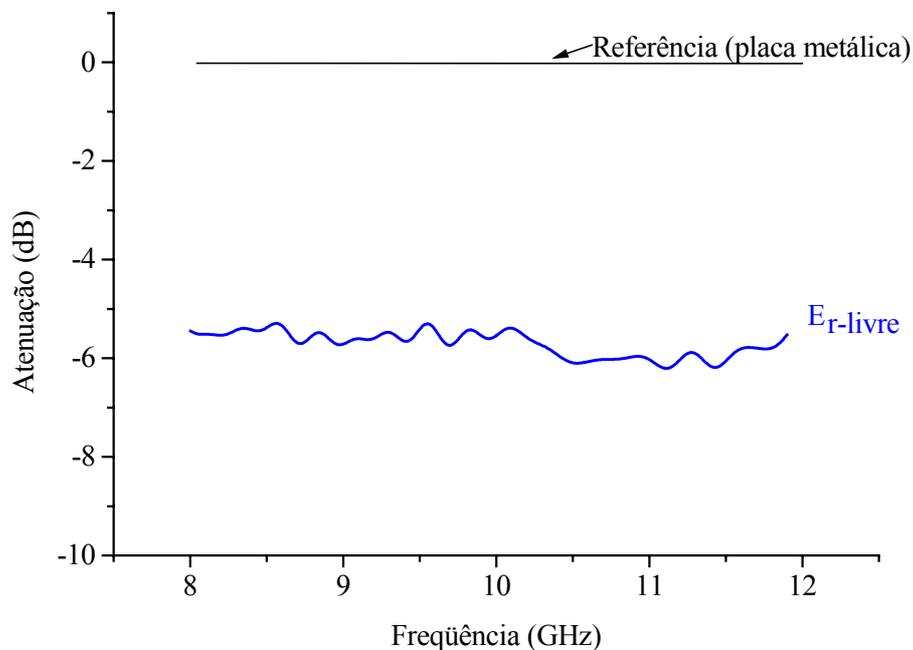


Figura 29. Medida em guia de onda da energia refletida ($E_{r-livre}$) pela resina epóxi pura

Pode-se observar pelo gráfico da Figura 29 que a resina epóxi pura possui uma reflexão de -5,3 a -6,2 dB em relação à referência, na faixa de frequências de 8 a 12 GHz. Para as frequências de 9 GHz e 11 GHz, o sinal refletido é igual a, respectivamente, -5,5dB e -5,7dB, que correspondem em porcentagem a 28,2% e 26,9%, respectivamente, utilizando a Equação 15 (conversão de dB em %). Ou seja, a resina epóxi reflete 28,2% (reflexão livre) (9 GHz) ou 26,9% (11GHz) da energia incidente (E_i) da onda eletromagnética em relação ao metal (100% refletor).

$$\% = 100 \left(10^{\frac{\text{dB}}{10}} \right), \quad (15)$$

onde:

% = valor do sinal, calculado em %,

dB = valor do sinal, na escala negativa, conforme leitura, em dB.

Os outros 71,8% (100% - 28,2%, em 9 GHz) e 73,1% (100% - 26,9%, em 11 GHz), do sinal incidente são transmitidos ou absorvidos pela resina epóxi pura. Assim, de acordo com a equação 1, tem-se que em 9 GHz $E_{r\text{-livre}}$ é igual a 28,2%, e $E_t + E_a$ é igual a 71,8%. Em 11 GHz $E_{r\text{-livre}}$ é igual a 26,9%, e $E_t + E_a$ é igual a 73,1%.

4.1.2 Energia transmitida (E_t)

O gráfico da Figura 30 mostra a medida da energia transmitida (E_t) pela resina epóxi pura, de 8 a 12 GHz. A linha reta perpendicular a zero no eixo da Atenuação (dB), foi obtida medindo-se a energia transmitida (E_t) sem a colocação da amostra no porta-amostra, ou seja, foi adotado como referência o ar atmosférico, normalizado para efeito de cálculo, como 100% transmissor. Assim, se o valor medido da energia transmitida de um material estiver próximo da referência, maior será a sua transmissão e vice-versa.

A onda eletromagnética propagando-se em um meio sempre é atenuada, isto é função da distância, independente desta ser transmitida em espaço livre, guia de onda ou meio coaxial (BALLANIS, 1997). Uma vez que o sinal de referência (transmissão do sinal do ar) foi normalizado para todas as medidas da energia transmitida, o efeito da atenuação da onda eletromagnética no guia de onda não é considerado nas medidas e nos cálculos.

Nas frequências de 9 GHz e 11 GHz, o sinal transmitido é igual a -1,6 dB e -1,50 dB, respectivamente, que corresponde em porcentagem a 69,2% e 70,8%,

respectivamente, utilizando-se a Equação 15 (conversão de dB em %). Ou seja, a resina epóxi transmite 69,2% (9 GHz) ou 70,8% (11 GHz) da energia incidente (E_i) da onda eletromagnética em relação ao ar (normalizado como 100% transmissor).

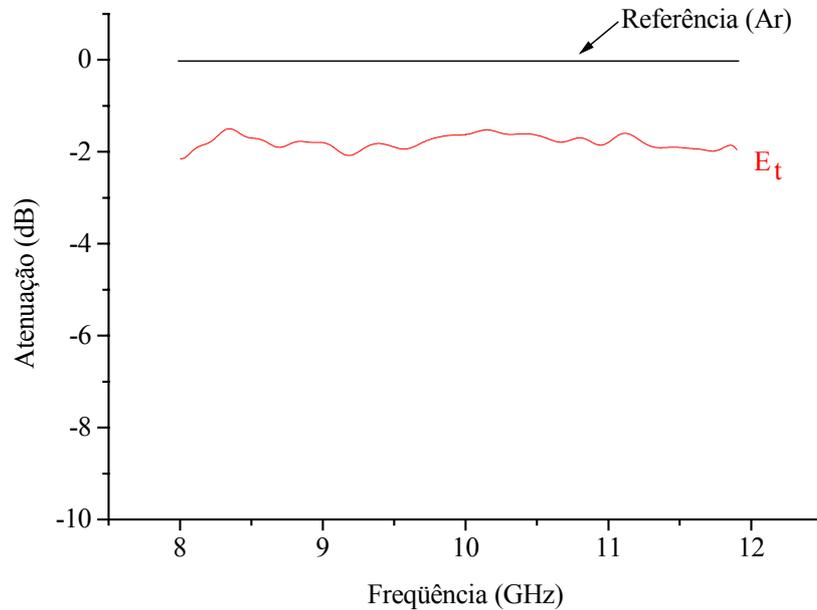


Figura 30. Medida em guia de onda da energia transmitida (E_t) pela resina epóxi pura

Os outros 30,8% (100% - 69,2%, em 9 GHz) e 29,2% (100% - 70,8%, em 11 GHz), do sinal incidente são absorvidos ou refletidos pela resina epóxi pura. Com os valores de $E_{r-livre}$ e E_t (equação 1) pode-se calcular a energia absorvida E_a .

4.1.3 Energia absorvida (E_a)

O gráfico da Figura 31 mostra a energia absorvida pela resina epóxi pura (E_a), em porcentagem, calculada de acordo com a Equação 1, onde a energia incidente (E_i) é normalizada como 100%. A linha reta perpendicular a zero no eixo da Atenuação (%) é a referência, isto é, um material com zero de absorção. Para as frequências de 9 GHz e 11GHz, a resina absorve 2,6% (- 0,11 dB) e 2,3% (- 0,10 dB), respectivamente, da energia incidente, calculada pela Equação 15. Esses valores baixos de absorção se devem ao fato da resina epóxi pura não possuir características de absorção de radiação eletromagnética na faixa de frequências compreendidas entre 8-12 GHz.

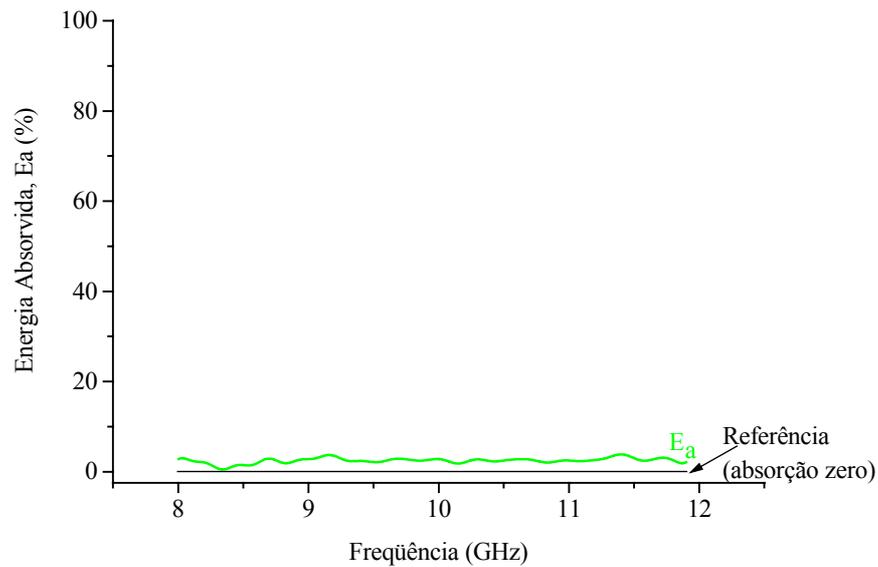


Figura 31. Cálculo da energia absorvida (E_a) pela resina epóxi pura, utilizando a Equação 1

O gráfico da Figura 32 mostra a distribuição de energia da onda eletromagnética na resina epóxi pura (E_a , E_t e $E_{R-livre}$), em 9 e 11 GHz, calculada de acordo com a equação 1, com os valores apresentados nos gráficos das Figuras 21 e 22.

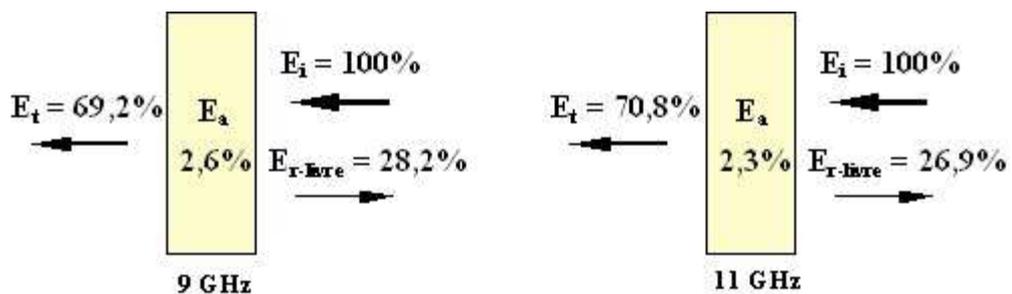


Figura 32. Distribuição da energia da onda eletromagnética na resina epóxi pura (E_a , E_t e $E_{R-livre}$), em 9 e 11 GHz

4.2 Ferrita de MnZn

A seguir são apresentados os resultados obtidos com o estudo do efeito da concentração e do tamanho de partícula da ferrita de MnZn nos parâmetros $E_{R-livre}$, E_t e E_a , conforme o esquema da Figura 3. A caracterização química da ferrita de MnZn não é apresentada e discutida neste trabalho, uma vez que foi realizada por Dias, 2000.

4.2.1 Energia refletida ($E_{R-livre}$)

O gráfico da Figura 33 relaciona as medidas da energia refletida ($E_{R-livre}$) para as relações mássicas ferrita:resina 0:10 (resina epóxi pura), 1:10, 2:10, 3:10, 4:10, 5:10, 6:10 e 7:10, com tamanho de partícula $\phi < 38 \mu\text{m}$, com a medida da energia refletida por uma placa metálica (100% refletora). A curva mais abaixo no gráfico da Figura 33 representa a resina epóxi pura apresentada na Figura 29. Pode-se observar pelo gráfico da Figura 33 que quanto maior a concentração de ferrita no material, maior é o caráter refletor do material, uma vez que a resposta eletromagnética se aproxima da referência (placa metálica).

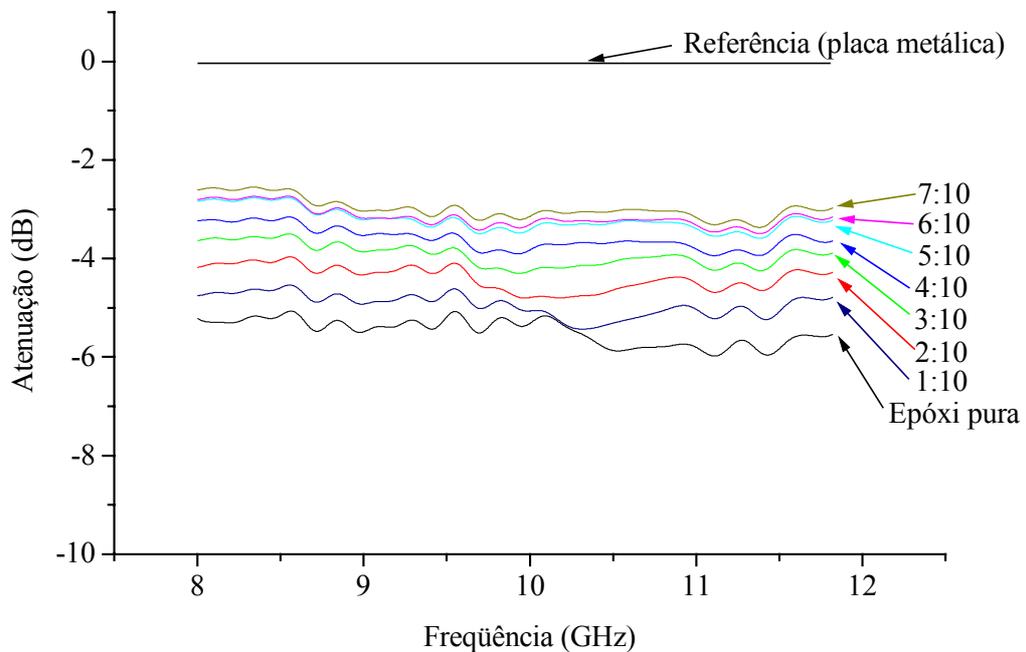


Figura 33. Medida em guia de onda da energia refletida ($E_{R-livre}$) da resina epóxi aditada com ferrita de MnZn, nas proporções em massa igual a 1:10, 2:10, 3:10, 4:10, 5:10, 6:10 e 7:10, com tamanho de partícula $\phi < 38 \mu\text{m}$

O gráfico da Figura 34 relaciona a energia refletida ($E_{R-livre}$) em porcentagem (calculada com a Equação 15) com a concentração de ferrita no MARE, a partir dos dados do gráfico da Figura 33, nas frequências de 9 GHz e 11 GHz. Como observado no gráfico da Figura 33, o aumento da concentração da ferrita aumenta a reflexão do material ($E_{R-livre}$). Pode-se observar pelo gráfico da Figura 34 que o valor da reflexão

está entre 26% e 28% para a resina epóxi pura, chegando a valores entre 48% e 50% para a proporção 7:10, ou seja, um aumento de até 24 pontos percentuais na reflexão.

Isto está relacionado com o aumento da diferença de impedância (Z) entre a superfície do MARE com o meio externo (ar), o que provoca uma maior reflexão do sinal incidente no MARE, reduzindo a quantidade de energia que penetra no material. A onda eletromagnética não penetra com eficiência em materiais que possuem uma impedância na sua superfície muito diferente do meio externo (JOHNSON, 1992; LEE, 1991).

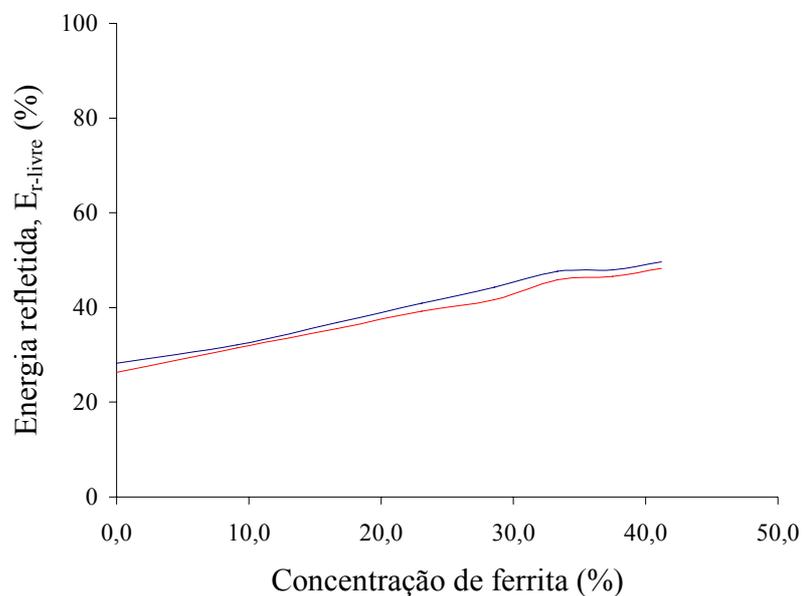


Figura 34. Energia refletida ($E_{r-livre}$) da resina epóxi aditada com ferrita de MnZn de tamanho de partícula $\phi < 38 \mu\text{m}$, nas frequências de 9 GHz (curva em azul) e de 11 GHz (curva em vermelho)

4.2.2 Energia transmitida (E_t)

O gráfico da Figura 35 relaciona as medidas da energia transmitida (E_t) das proporções em massa de ferrita:resina epóxi de 0:10 (resina epóxi pura), 1:10, 2:10, 3:10, 4:10, 5:10, 6:10 e 7:10, com tamanho de partícula $\phi < 38 \mu\text{m}$. A curva mais acima no gráfico da Figura 35 (excetuando a referência) representa a resina epóxi pura apresentada na Figura 30. Pode-se observar pelo gráfico da Figura 35 que quanto maior

a concentração de ferrita no material, mais distante da referência e da resina epóxi as curvas vão se tornando, ou seja, menor é a energia transmitida pelo material (E_t).

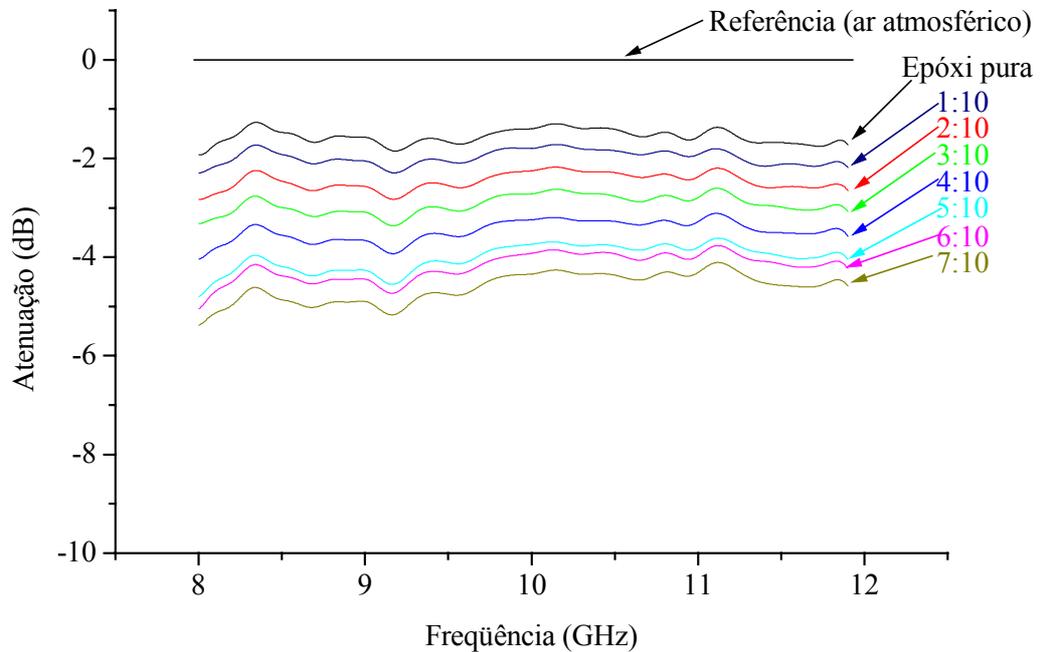


Figura 35. Medida em guia de onda da energia transmitida (E_t) da resina epóxi aditada com ferrita de MnZn, nas proporções em massa 1:10, 2:10, 3:10, 4:10, 5:10, 6:10 e 7:10, com tamanho de partícula $\phi < 38\mu\text{m}$

O gráfico da Figura 36 relaciona a energia transmitida (E_t) em porcentagem (calculada com a Equação 15) com a concentração de ferrita no MARE, a partir dos dados do gráfico da Figura 35, nas frequências de 9 e 11 GHz. Como observado no gráfico da Figura 35, o aumento da concentração da ferrita reduz a transmissão da energia da onda eletromagnética no MARE.

Pode-se observar pelo gráfico da Figura 36 que o valor da transmissão está em torno de 70% para a resina epóxi pura, decrescendo para valores entre 32% a 37% para a proporção 7:10, ou seja, uma redução de até 38 pontos percentuais na transmissão.

Essa tendência de diminuição dos valores de E_t com o aumento da concentração se deve a dois fatores:

1. O aumento da reflexão ($E_{r\text{-livre}}$) nos corpos-de-prova com maior concentração de ferrita reduz a quantidade de energia que penetra no MARE, como discutido no item anterior (energia refletida – $E_{r\text{-livre}}$).

2. Uma vez que com o aumento da concentração de ferrita a reflexão aumenta (E_r livre) e a transmissão diminui (E_t), e sendo a ferrita MnZn um material absorvedor de radiação eletromagnética, o aumento de sua concentração faz com que o MARE absorva uma quantidade maior da energia da onda eletromagnética (E_a).

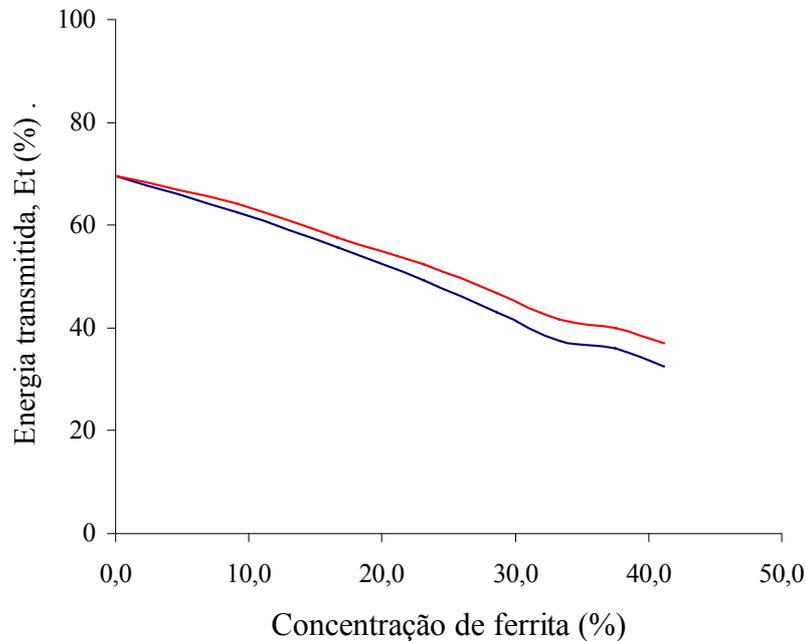


Figura 36. Energia transmitida (E_t) da resina epóxi aditada com ferrita de MnZn de tamanho de partícula $\phi < 38 \mu\text{m}$, nas frequências 9 GHz (curva em azul) e 11 GHz (curva em vermelho)

4.2.3 Energia absorvida (E_a)

O gráfico da Figura 37 relaciona os valores calculados, de acordo com a Equação 1, da energia absorvida (E_a), para as relações mássicas ferrita:resina 0:10 (resina epóxi pura), 1:10, 2:10, 3:10, 4:10, 5:10, 6:10 e 7:10, com tamanho de partícula $\phi < 38\mu\text{m}$. A curva mais abaixo no gráfico da Figura 37 representa a resina epóxi pura apresentada na Figura 31, com os dados em decibéis convertidos para porcentagem, utilizando-se a Equação 15. Pode-se observar pelo gráfico da Figura 37 que quanto maior a concentração de ferrita no material, mais absorvedor o material vai se tornando, ou seja, maior é a energia absorvida pelo material (E_a).

O gráfico da Figura 38 relaciona a energia absorvida (E_a) em porcentagem, a partir dos dados do gráfico da Figura 37, nas frequências de 9 e 11 GHz. Como

observado no gráfico da Figura 37, o aumento da concentração da ferrita aumenta a energia absorvida pelo MARE de 2% na resina epóxi pura para 18% na relação 7:10.

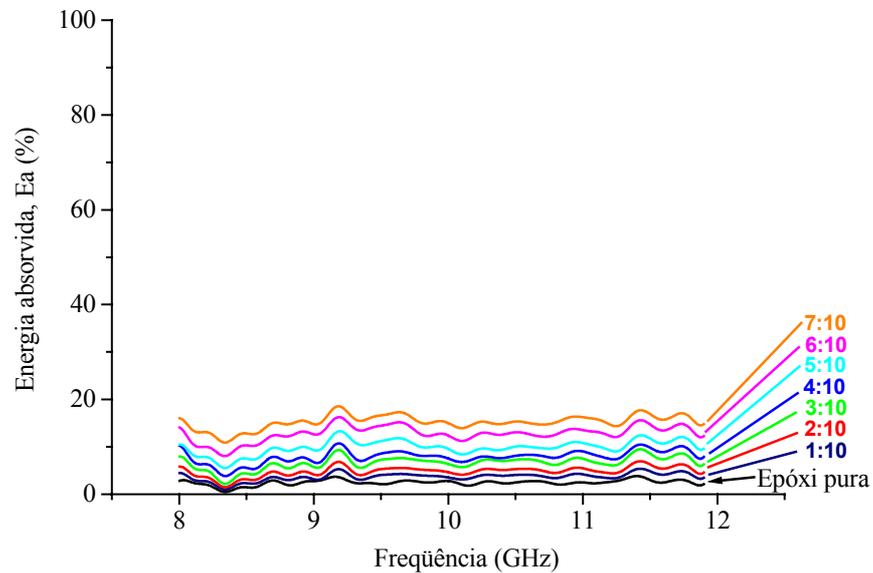


Figura 37. Valores calculados pela Equação 1 para a energia absorvida (E_a) da resina epóxi aditada com ferrita de MnZn, nas proporções em massa igual a 1:10, 2:10, 3:10, 4:10, 5:10, 6:10 e 7:10, com tamanho de partícula $\phi < 38\mu\text{m}$

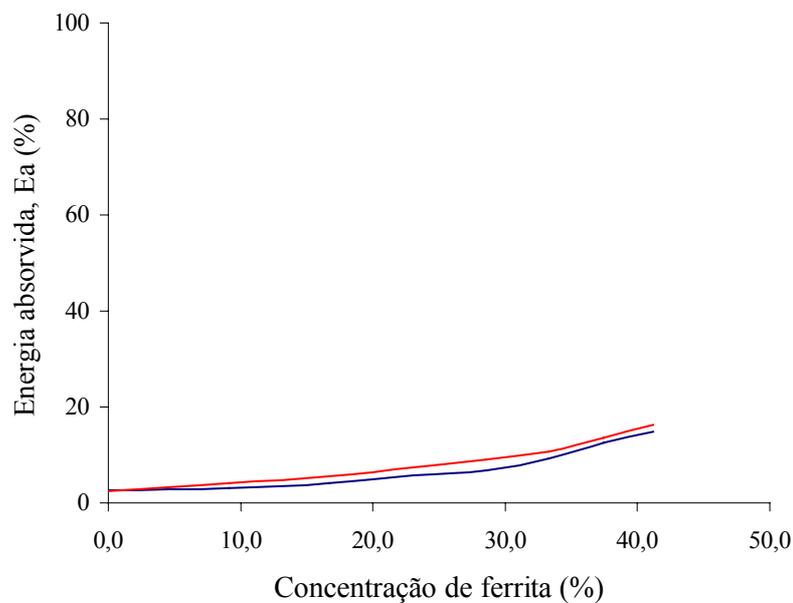


Figura 38. Energia absorvida (E_a) da resina epóxi aditada com ferrita de MnZn de tamanho de partícula $\phi < 38\mu\text{m}$, nas frequências 9 GHz (curva em azul) e 11 GHz (curva em vermelho)

A Figura 39 mostra a distribuição de energia da onda eletromagnética na resina epóxi aditada com ferrita de MnZn (E_a , E_t e $E_{r-livre}$), em 9 e 11 GHz, calculada de acordo com a equação 1, com os valores apresentados nos gráficos das Figuras 34, 36 e 38.

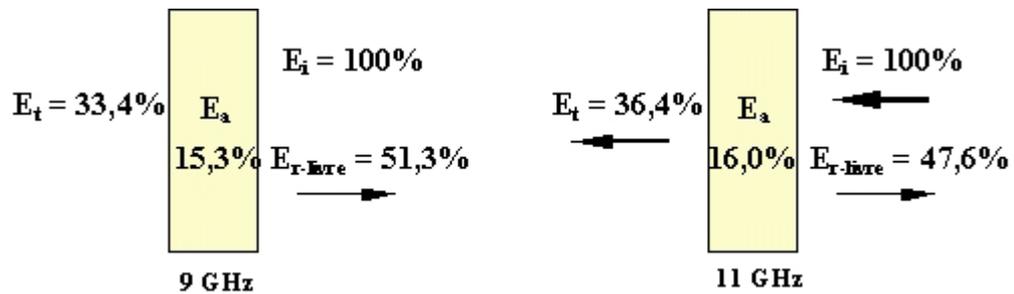


Figura 39. Esquema da distribuição da energia da onda eletromagnética na resina epóxi aditada com ferrita de MnZn na proporção em massa ferrita:resina 7:10, com tamanho de partícula $\phi < 38 \mu\text{m}$ – (E_a , E_t e $E_{r-livre}$), em 9 e 11 GHz

As faixas de tamanhos de partícula estudadas foram escolhidas de maneira que fosse verificado se a energia absorvida teria variação significativa, uma vez que as três faixas: $\phi < 38 \mu\text{m}$, $38 \mu\text{m} < \phi < 75 \mu\text{m}$ e $75 \mu\text{m} < \phi < 150 \mu\text{m}$ estão situadas entre aquelas caracterizadas por Nohara, 2003, onde foram estudadas duas ferritas: uma ferrita MnZn com tamanho de partícula $0,2 \mu\text{m} < \phi < 10 \mu\text{m}$ e uma outra com tamanho de partícula $\phi > 200 \mu\text{m}$, ambas com caráter ferrimagnético, mas com perfis diferentes entre os seus espectros Mössbauer.

As medidas da energia refletida ($E_{r-livre}$) e energia transmitida (E_t), bem como os valores calculados da energia absorvida (E_a) utilizando-se a Equação 2, para os tamanhos de partícula $38 \mu\text{m} < \phi < 75 \mu\text{m}$ e $75 \mu\text{m} < \phi < 150 \mu\text{m}$, e para a mistura em partes iguais dos três tamanhos de partícula não estão apresentados neste trabalho, porque seus resultados são muito semelhantes aos obtidos para o tamanho de partícula $\phi < 38 \mu\text{m}$. Isto significa que para as faixas de tamanho de partícula estudadas, não foram observadas diferenças na absorção em função da variação do tamanho de partícula da ferrita.

A Figura 40 apresenta os valores calculados, pela Equação 1, para a energia absorvida (E_a) na faixa de frequência entre 8 e 12 GHz, para os corpos-de-prova

preparados com ferritas de tamanho de partícula $\phi < 38 \mu\text{m}$, $38 \mu\text{m} < \phi < 75 \mu\text{m}$ e $75 \mu\text{m} < \phi < 150 \mu\text{m}$, na proporção 7:10 em massa ferrita:resina.

Observa-se na Figura 40 que a porcentagem de energia absorvida em 9 GHz e 11 GHz são, respectivamente, 17,5% e 18,8% para o tamanho de partícula $\phi < 38 \mu\text{m}$, e 16,9% e 18,2% para o tamanho de partícula $75 \mu\text{m} < \phi < 150 \mu\text{m}$, correspondendo à uma diferença de 0,6%, tanto em 9 GHz como em 11 GHz. Isto equivale a 0,03 dB (Equação 15). Essa diferença está abaixo da sensibilidade do aparelho, que é de 0,05 dB, portanto, não é significativa em termos da diferença entre as faixas de tamanho de partícula estudadas, como se observa na Figura 40 pela sobreposição das curvas com os diferentes tamanhos de partícula.

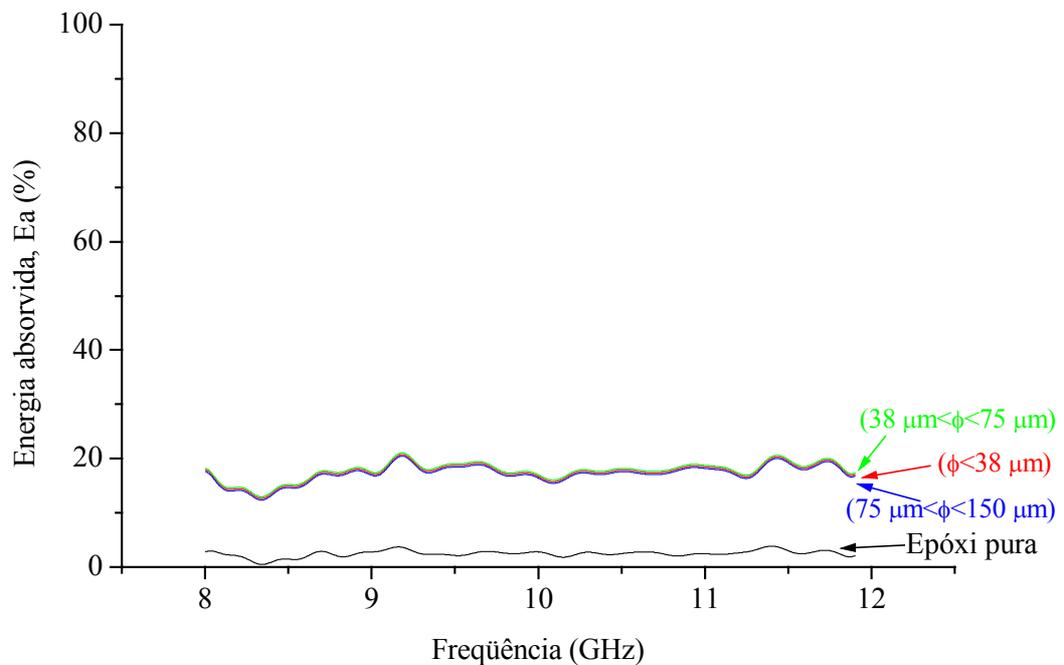


Figura 40. Valores calculados pela Equação 1 para a energia absorvida (E_a) da resina epóxi aditada com ferrita de MnZn, na proporção em massa igual a 7:10, com tamanho de partícula $\phi < 38 \mu\text{m}$, $38 \mu\text{m} < \phi < 75 \mu\text{m}$ e $75 \mu\text{m} < \phi < 150 \mu\text{m}$

4.2.4 Energia refletida ($E_{r-placa}$)

A seguir são apresentados os resultados obtidos com o estudo do efeito da colocação de uma placa metálica 100% refletora sob o MARE, conforme esquema da Figura 4, sobre a energia refletida ($E_{r-placa}$) para o tamanho de partícula $\phi < 38 \mu\text{m}$.

O gráfico da Figura 41 relaciona as medidas da energia refletida ($E_{r-placa}$) das relações em massa de ferrita:resina epóxi de 0:10 (resina epóxi pura), 1:10, 2:10, 3:10, 4:10, 5:10, 6:10 e 7:10, com tamanho de partícula $\phi < 38 \mu\text{m}$, com a medida da energia refletida por uma placa metálica 100% refletora. Pode-se observar no gráfico da Figura 41 que quanto maior a concentração de ferrita no material, mais se afastam da referência as curvas de refletividade dos MARE em estudo, ou seja, menor é a energia refletida pelo material ($E_{r-placa}$).

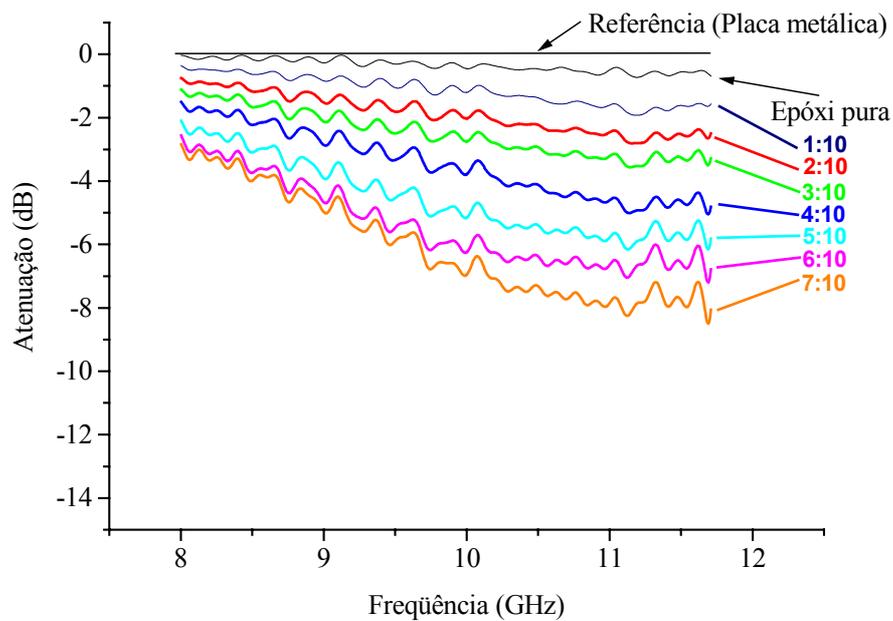


Figura 41. Medida em guia de onda da energia refletida ($E_{r-placa}$) da resina epóxi aditada com ferrita de MnZn, nas proporções em massa igual a 1:10, 2:10, 3:10, 4:10, 5:10, 6:10 e 7:10, com tamanho de partícula $\phi < 38 \mu\text{m}$, colocada sobre uma placa metálica 100% refletora

O gráfico da Figura 42 relaciona a porcentagem de energia refletida pelo MARE sobre uma placa metálica ($E_{r-placa}$) (calculada com a Equação 15) com a concentração de ferrita no MARE, a partir dos dados do gráfico da Figura 41, nas frequências de 9 e 11

GHz. Como observado no gráfico da Figura 42, o aumento da concentração da ferrita reduz a energia refletida do MARE.

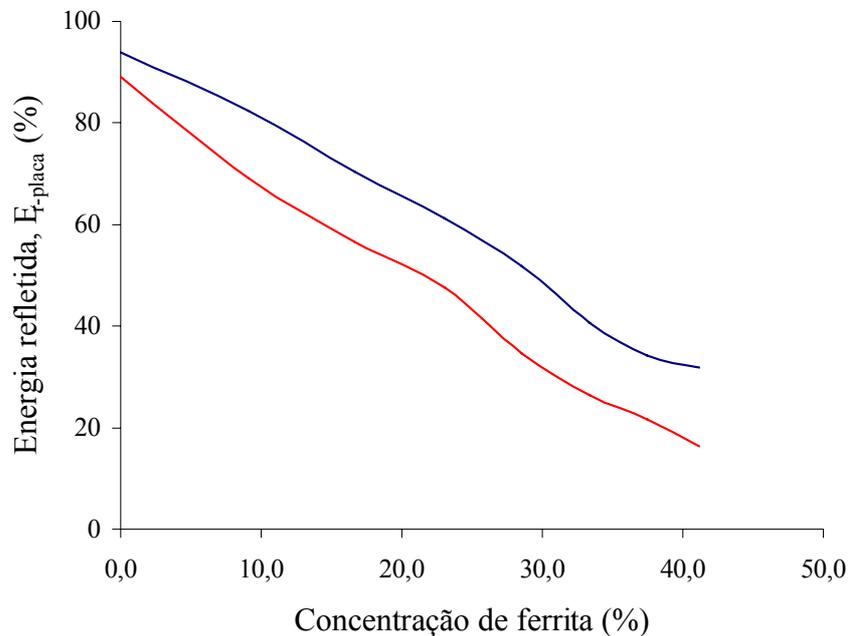


Figura 42. Energia refletida ($E_{r-placa}$) da resina epóxi aditada com ferrita de MnZn de tamanho de partícula $\phi < 38 \mu m$, nas frequências 9 GHz (azul) e 11 GHz (vermelho)

Comparando-se o gráfico da Figura 34 com o gráfico da Figura 42, observa-se que no gráfico da Figura 34 ($E_{r-livre}$), o valor de $E_{r-livre}$ varia de 32% para 50% (9 GHz) e de 31% para 48% (11 GHz), para as relações mássicas 1:10 e 7:10, respectivamente. Já no gráfico da Figura 42, os valores de $E_{r-placa}$ para as mesmas relações mássicas, 1:10 e 7:10, variam de 82% para 32% (9 GHz) e de 69% para 16% (11 GHz), respectivamente, portanto, houve uma inversão do comportamento da energia refletida quando o material foi posicionado sobre uma placa metálica 100% refletora. Enquanto na Figura 34 a reflexão ($E_{r-livre}$) aumenta com o aumento da concentração de ferrita, na Figura 42 a reflexão ($E_{r-placa}$) se reduz com o aumento da concentração de ferrita.

A mudança no comportamento da reflexão observada na comparação da Figura 34 com a Figura 42, que é devido ao fato do material ser posicionado sobre uma placa 100% refletora, é atribuída ao mecanismo de atenuação da energia da onda eletromagnética baseado na obtenção de uma espessura elétrica do MARE de $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda, isto é, o cancelamento da onda eletromagnética refletida na parte frontal com a onda eletromagnética refletida na parte posterior, devido à estas reflexões

estarem com fases invertidas em 180° , conforme esquema da Figura 9 (MARE posicionado sobre uma placa metálica). Se a potência da reflexão na parte frontal (E_{r1}) for igual à potência da reflexão posterior ($E_{r2} + E_{r3} + \dots + E_{rn}$), acontecerá um mútuo cancelamento de energia, que será de 100%. Se essas potências forem diferentes, o cancelamento não será total e, portanto, haverá energia refletida residual ($E_{r\text{-residual}} = |E_{r1} - (E_{r2} + E_{r3} + \dots + E_{rn})|$).

Essa energia refletida residual pode ser observada pela avaliação das medidas que foram feitas conforme o esquema da Figura 3 ($E_{r\text{-livre}}$ e E_t), com a ajuda do esquema representado na Figura 43 (MARE sem placa metálica), onde se verifica que também existe reflexão posterior quando não se posiciona o MARE sobre uma placa metálica, apesar da potência dessa reflexão ser bem menor que a potência da reflexão posterior esquematizada na Figura 9 (MARE posicionado sobre uma placa metálica).

A energia transmitida representada na Figura 43 como $E_{t\text{-externo}}$ foi analisada anteriormente na Figura 36 (redução de E_t com o aumento na concentração de ferrita), onde se verifica que existe uma elevada transmissão de energia (E_t) nas medidas feitas conforme o esquema da Figura 3.

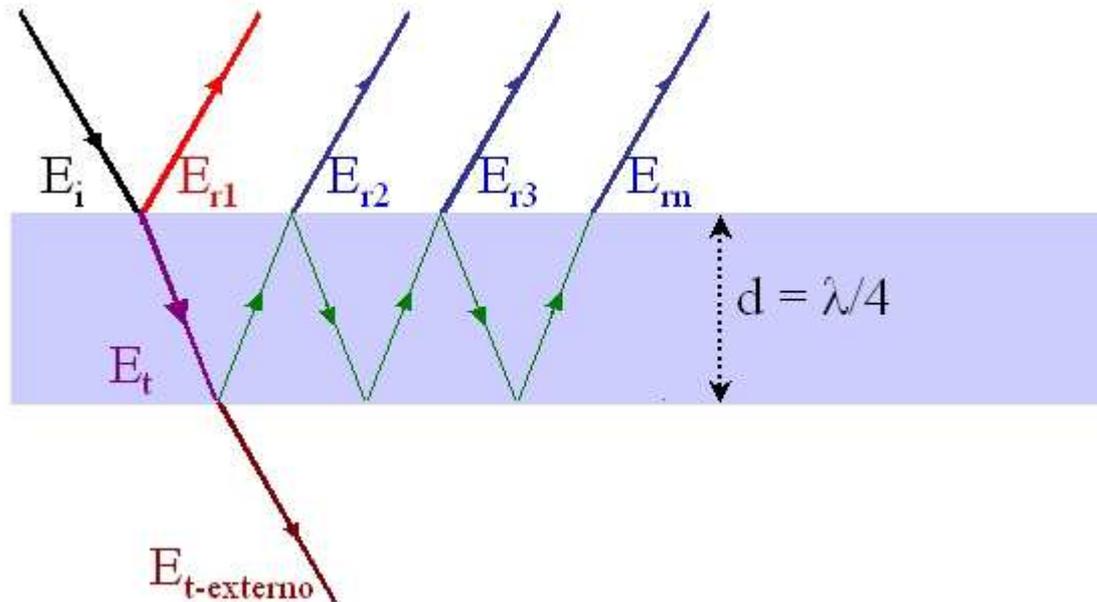


Figura 43. Esquema de reflexão de onda em um MARE (■) com espessura elétrica igual a $\lambda/4$ – ■ onda incidente (E_i), ■ reflexão frontal (E_{r1}), ■ reflexão posterior (E_{r2} , E_{r3} , ..., E_m), ■ transmissão na interface meio externo/MARE (E_t), ■ transmissão na interface MARE/meio externo ($E_{t\text{-externo}}$), ■ múltiplas reflexões internas no MARE

A redução na reflexão também é baseada em perdas magnéticas e dielétricas, uma vez que a ferrita de MnZn possui mecanismos de absorção da energia da onda eletromagnética, ou seja, valores da parte real, maiores que um e zero, respectivamente, dos parâmetros permeabilidade e permissividade na faixa de frequências compreendidas entre 8-12 GHz (NOHARA, 2003). Essa redução na reflexão é observada nas Figuras 9 e 43 com as múltiplas reflexões sofridas pela onda no interior do MARE .

A atenuação da onda eletromagnética pelo mecanismo de $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda é citado superficialmente em diversas literaturas (YUSOFF, 2002; GIANNAKOPOULOU, 2003; MAOSHENG, 2003a; GEAR, 2004), sem, no entanto, fornecer detalhes sobre a constituição do material, os parâmetros E_a , E_r e E_t e sua relação com a atenuação com uma placa metálica sob o MARE.

4.3 Ferrita de Ba

A seguir é apresentado o estudo do efeito da concentração nos parâmetros $E_{r-livre}$, E_t e E_a , obtidos para a ferrita de Ba. Neste caso, foi estudado somente um tamanho de partícula $\phi < 38 \mu\text{m}$, uma vez que o fabricante tinha disponível somente esse tamanho de partícula. A composição da ferrita de Ba está descrita no Anexo A.

4.3.1 Energia refletida ($E_{r-livre}$)

O gráfico da Figura 44 relaciona as medidas da energia refletida ($E_{r-livre}$) das relações mássicas ferrita:resina 0:10 (resina epóxi pura), 1:10, 2:10, 3:10, 4:10, 5:10, 6:10 e 7:10, com tamanho de partícula $\phi < 38 \mu\text{m}$, com a medida da energia refletida por uma placa metálica (100% refletora). A curva mais abaixo no gráfico da Figura 44 representa a resina epóxi pura apresentada na Figura 29. Pode-se observar pelo gráfico da Figura 44 que quanto maior a concentração de ferrita no material, mais este se aproxima da referência, ou seja, maior é a energia refletida pelo material ($E_{r-livre}$). O comportamento da ferrita de Ba é o mesmo da ferrita de MnZn para as medidas da energia refletida ($E_{r-livre}$).

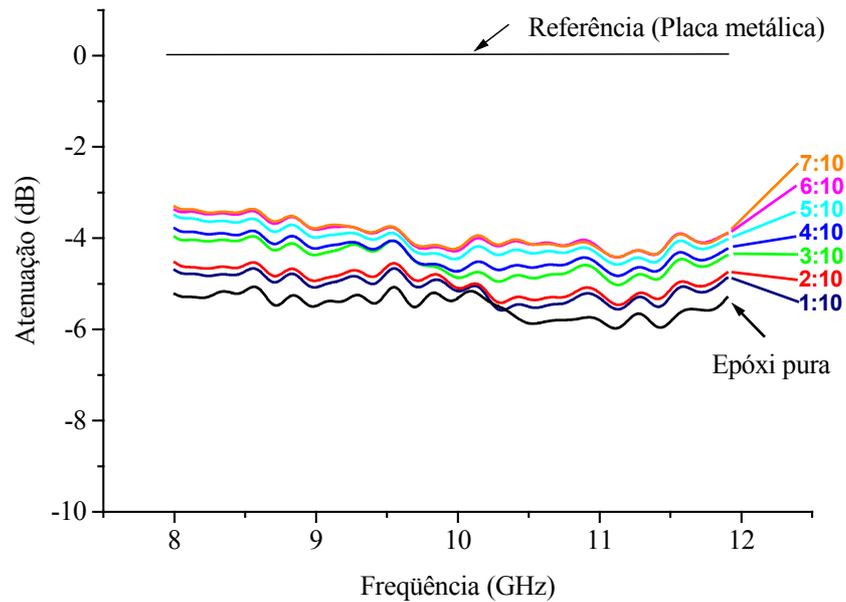


Figura 44. Medida em guia de onda da energia refletida ($E_{R-livre}$) da resina epóxi aditivada com ferrita de Ba, nas proporções em massa igual a 1:10, 2:10, 3:10, 4:10, 5:10, 6:10 e 7:10, com tamanho de partícula $\phi < 38 \mu\text{m}$

O gráfico da Figura 45 relaciona a energia refletida ($E_{R-livre}$) em porcentagem (calculada com a Equação 15) com a concentração de ferrita no MARE, a partir dos dados do gráfico da Figura 44, nas frequências de 9 GHz e 11 GHz. Como observado no gráfico da Figura 44, o aumento da concentração da ferrita aumenta a reflexão do material ($E_{R-livre}$). Pode-se observar pelo gráfico da Figura 45 que o valor da reflexão está entre 26% e 28% para a resina epóxi pura, chegando a valores entre 38% e 42% para a proporção 7:10, ou seja, um aumento de até 16 pontos percentuais na reflexão.

Comparando-se o gráfico da Figura 33 com o gráfico da Figura 44, verifica-se para a ferrita de Ba o mesmo comportamento ocorrido para a ferrita de MnZn, ou seja, o aumento da reflexão ($E_{R-livre}$) com o aumento na concentração de ferrita na resina epóxi. Este comportamento está relacionado à impedância do material (Z), que aumenta à medida que aumenta a concentração de ferrita no material, semelhantemente ao ocorrido com a ferrita de MnZn.

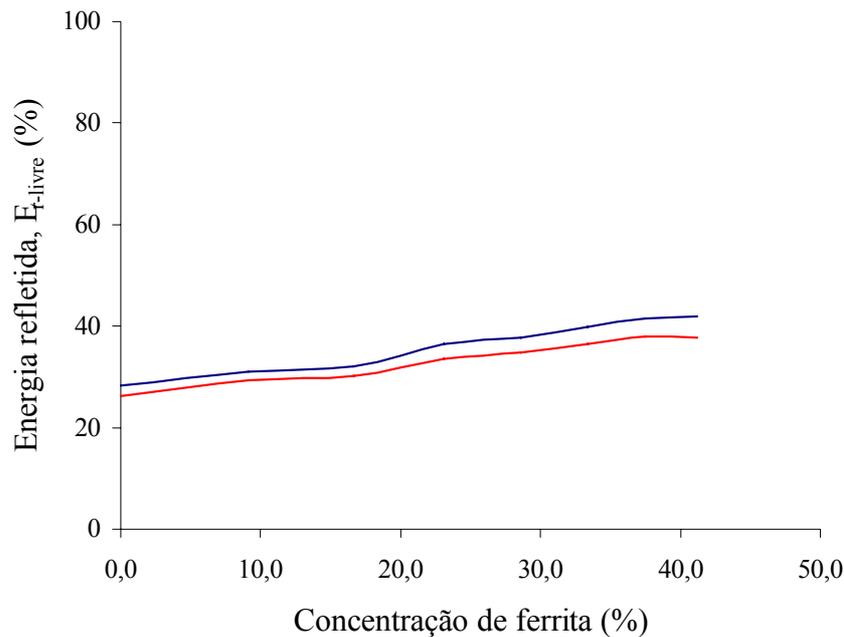


Figura 45. Energia refletida ($E_{r-livre}$) da resina epóxi aditada com ferrita de Ba de tamanho de partícula $\phi < 38 \mu\text{m}$, nas frequências de 9 GHz (azul) e de 11 GHz (vermelho)

4.3.2 Energia transmitida (E_t)

O gráfico da Figura 46 relaciona as medidas da energia transmitida (E_t) das proporções em massa de ferrita:resina epóxi de 0:10 (resina epóxi pura), 1:10, 2:10, 3:10, 4:10, 5:10, 6:10 e 7:10, com tamanho de partícula $\phi < 38 \mu\text{m}$. A curva mais acima no gráfico da Figura 46 (excetuando a referência) representa a resina epóxi pura apresentada na Figura 41. Pode-se observar pelo gráfico da Figura 46 que quanto maior a concentração de ferrita no material, o comportamento do MARE se distancia das curvas da referência e da resina epóxi, ou seja, menor é a energia transmitida pelo material (E_t). A ferrita de Ba apresenta comportamento semelhante ao da ferrita de MnZn para a energia transmitida (E_t).

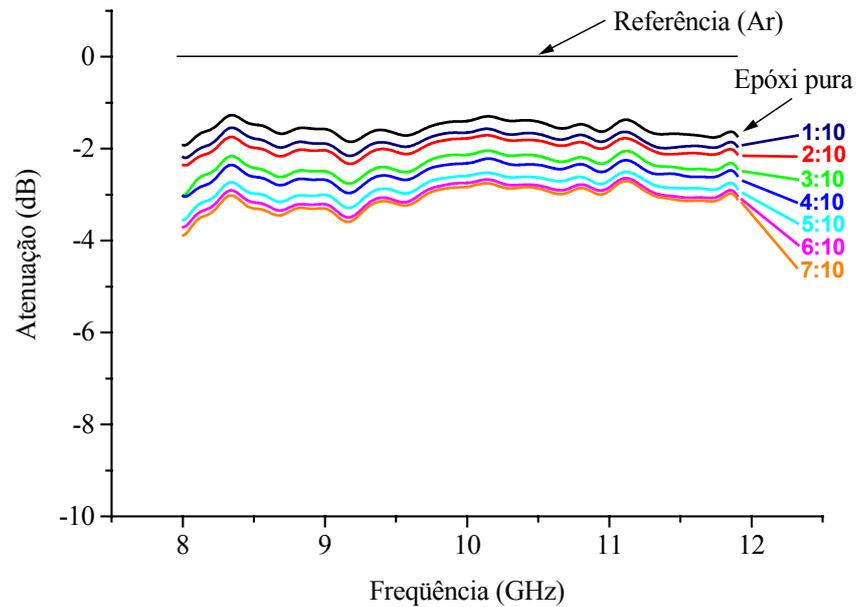


Figura 46. Medida em guia de onda da energia transmitida (E_t) da resina epóxi aditada com ferrita de Ba, nas proporções em massa 1:10, 2:10, 3:10, 4:10, 5:10, 6:10 e 7:10, com tamanho de partícula $\phi < 38 \mu\text{m}$

O gráfico da Figura 47 relaciona a energia transmitida (E_t) em porcentagem (calculada com a Equação 15) com a concentração de ferrita no MARE, a partir dos dados do gráfico da Figura 46, nas frequências de 9 GHz e 11 GHz. Como observado no gráfico da Figura 46, o aumento da concentração da ferrita de Ba reduz a transmissão da energia da onda eletromagnética no MARE, de maneira semelhante observado para a ferrita de MnZn.

Pode-se observar nos gráficos da Figura 47 que o valor da transmissão está em torno de 70% para a resina epóxi pura, decrescendo para valores entre 47% e 51% para a proporção 7:10, ou seja, uma redução de até 23 pontos percentuais na transmissão. Essa tendência de diminuição dos valores de E_t com o aumento da concentração para a ferrita de Ba é a mesma já verificada para a ferrita de MnZn.

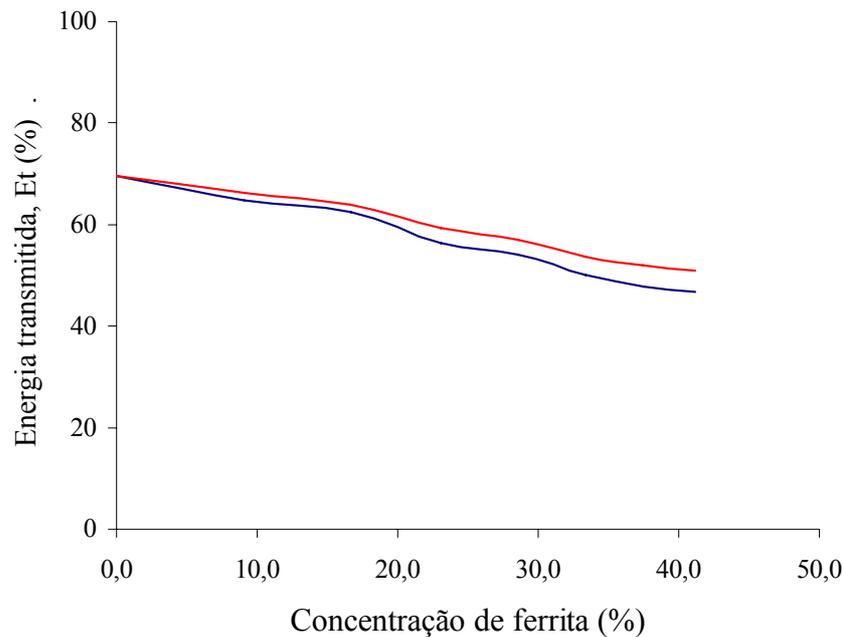


Figura 47. Energia transmitida (E_t) da resina epóxi aditada com ferrita de Ba de tamanho de partícula $\phi < 38 \mu\text{m}$, nas frequências de 9 GHz (azul) e de 11 GHz (vermelho)

4.3.3 Energia absorvida (E_a)

O gráfico da Figura 48 relaciona os valores calculados, de acordo com a Equação 1, da energia absorvida (E_a), para as relações mássicas ferrita:resina de 0:10 (resina epóxi pura), 1:10, 2:10, 3:10, 4:10, 5:10, 6:10 e 7:10, com tamanho de partícula $\phi < 38 \mu\text{m}$. A curva mais abaixo no gráfico da Figura 48 representa a resina epóxi pura apresentada na Figura 31, com os dados em decibéis convertidos para porcentagem, utilizando-se a Equação 15. Pode-se observar na Figura 48 que quanto maior a concentração de ferrita no material, mais absorvedor o material vai se tornando, ou seja, maior é a energia absorvida pelo material (E_a). O comportamento da energia absorvida (E_a) na ferrita de Ba é o mesmo verificado para a ferrita de MnZn.

O gráfico da Figura 49 relaciona a energia absorvida (E_a) em porcentagem, a partir dos dados do gráfico da Figura 48, nas frequências de 9 GHz e 11 GHz. Como observado no gráfico da Figura 48, o aumento da concentração de ferrita de Ba aumenta a energia absorvida pelo MARE, de maneira similar ao observado para a ferrita de MnZn.

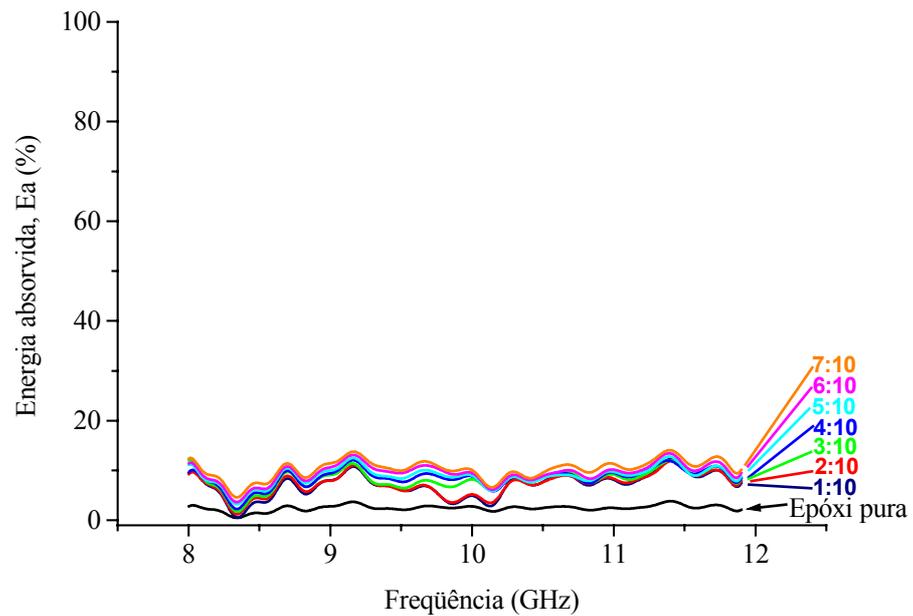


Figura 48. Valores calculados pela Equação 1 para a energia absorvida (E_a) da resina epóxi aditivada com ferrita de Ba, nas proporções em massa igual a 1:10, 2:10, 3:10, 4:10, 5:10, 6:10 e 7:10, com tamanho de partícula $\phi < 38 \mu\text{m}$

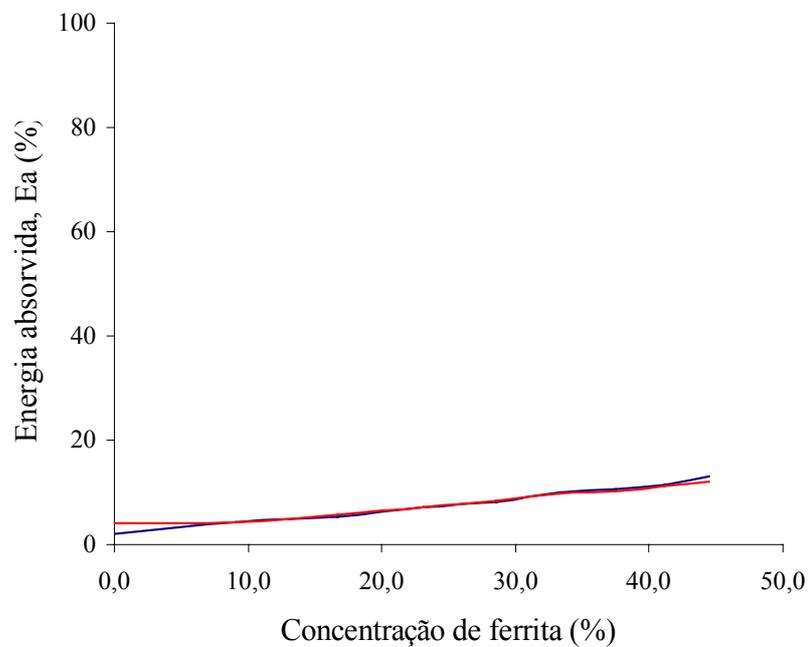


Figura 49. Energia absorvida (E_a) da resina epóxi aditivada com ferrita de Ba de tamanho de partícula $\phi < 38 \mu\text{m}$, nas frequências de 9 GHz (azul) e de 11 GHz (vermelho)

A Figura 50 mostra a distribuição de energia da onda eletromagnética na resina epóxi aditada com ferrita de Ba (E_a , E_t e $E_{r-livre}$), em 9 e 11 GHz, calculada de acordo com a equação 1, com os valores apresentados nos gráficos das Figuras 45, 47 e 49.

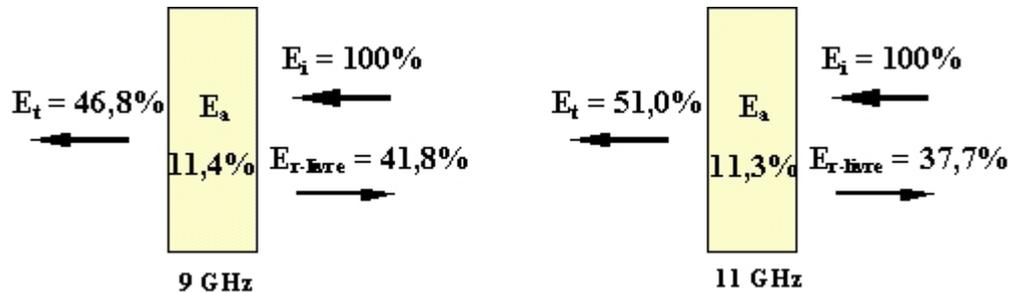


Figura 50. Distribuição da energia da onda eletromagnética na resina epóxi aditada com ferrita de Ba na proporção em massa ferrita:resina 7:10, com tamanho de partícula $\phi < 38 \mu\text{m}$ – (E_a , E_t e $E_{r-livre}$), em 9 e 11 GHz

4.3.4 Energia refletida ($E_{r-placa}$)

A seguir são apresentados os resultados obtidos com o estudo do efeito da colocação de uma placa metálica 100% refletora sob o MARE, conforme esquema da Figura 4, sobre a energia refletida ($E_{r-placa}$) para o tamanho de partícula $\phi < 38 \mu\text{m}$.

O gráfico da Figura 51 mostra as medidas da energia refletida ($E_{r-placa}$) das relações em massa de ferrita:resina epóxi de 0:10 (resina epóxi pura), 1:10, 2:10, 3:10, 4:10, 5:10, 6:10 e 7:10, com tamanhos de partícula $\phi < 38 \mu\text{m}$, com a medida da energia refletida por uma placa metálica (100% refletiva). Pode-se observar pelo gráfico da Figura 51 que quanto maior a concentração de ferrita no material, mais distante da referência as curvas vão se tornando, ou seja, menor é a energia refletida pelo material ($E_{r-placa}$). O comportamento da energia refletida ($E_{r-placa}$) para o MARE processado com a ferrita de Ba é o mesmo comportamento verificado para a ferrita de MnZn.

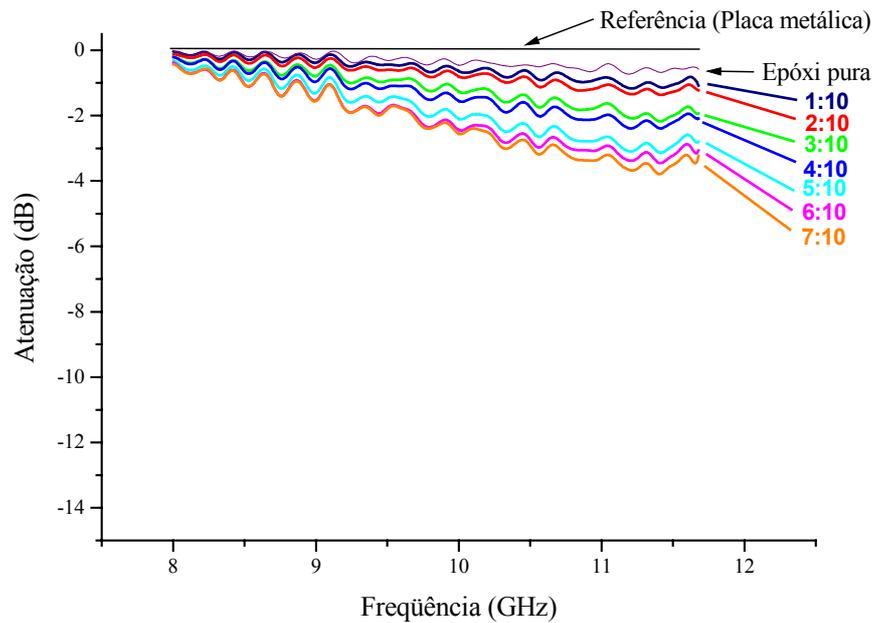


Figura 51. Medida em guia de onda da energia refletida ($E_{r-placa}$) da resina epóxi aditivada com ferrita de Ba, nas proporções em massa igual a 1:10, 2:10, 3:10, 4:10, 5:10, 6:10 e 7:10, com tamanho de partícula $\phi < 38 \mu\text{m}$, colocada sobre uma placa metálica 100% refletora

Os gráficos da Figura 52 relacionam a porcentagem da energia refletida pelo MARE sobre uma placa metálica ($E_{r-placa}$) (calculada com a Equação 15) com a concentração de ferrita no MARE, a partir dos dados do gráfico da Figura 51, nas frequências de 9 GHz e 11 GHz. Como observado no gráfico da Figura 52, o aumento da concentração da ferrita de Ba reduz a energia refletida do MARE, semelhante ao ocorrido com o MARE processado com a ferrita de MnZn. O efeito da colocação da placa metálica é o mesmo observado para os corpos-de-prova com a ferrita de MnZn.

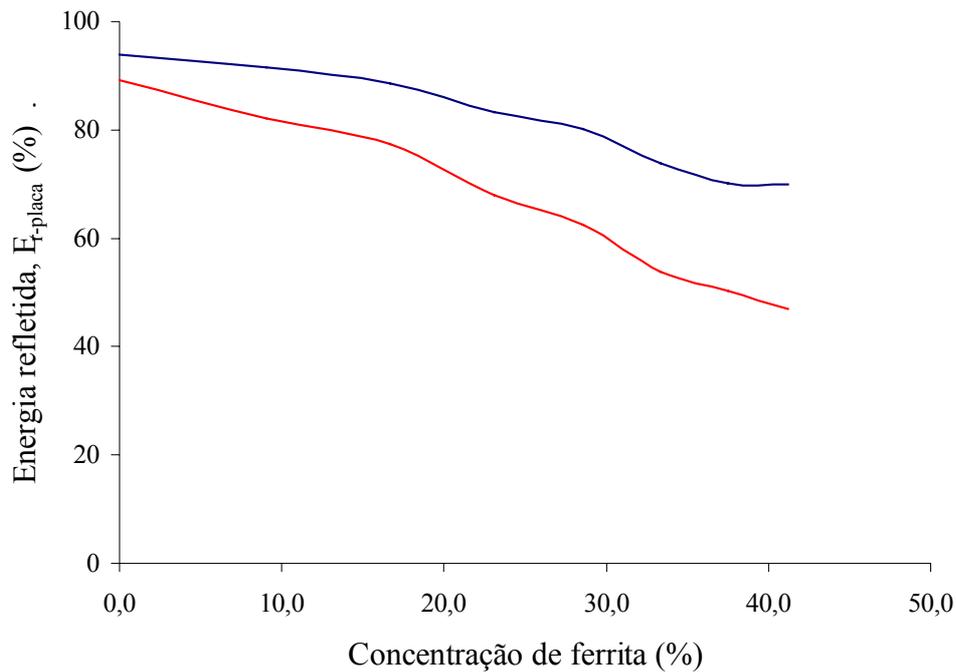


Figura 52. Energia refletida ($E_{r-placa}$) da resina epóxi aditada com ferrita de Ba de tamanho de partícula $\phi < 38 \mu m$, nas frequências de 9 GHz (azul) e de 11 GHz (vermelho)

Comparando-se o gráfico da Figura 45 com o gráfico da Figura 52, observa-se que no gráfico da Figura 45 ($E_{r-livre}$), o valor de $E_{r-livre}$ varia de 31% para 42% (9 GHz) e de 29% para 38% (11 GHz), para as relações mássicas 1:10 e 7:10, respectivamente. Já os gráficos da Figura 52 mostram os valores de $E_{r-placa}$ para as mesmas relações mássicas, 1:10 e 7:10, variando de 92% para 70% (9 GHz) e de 82% para 47% (11 GHz), respectivamente. Portanto, houve uma inversão do comportamento da reflexão quando o material foi posicionado sobre uma placa metálica 100% refletora. Enquanto na Figura 45 a reflexão ($E_{r-livre}$) aumenta com o aumento da concentração de ferrita, na Figura 52 a reflexão ($E_{r-placa}$) diminui com o aumento da concentração de ferrita, um comportamento semelhante ao observado para o MARE obtido com a ferrita de MnZn.

O mecanismo responsável pela atenuação da energia da onda eletromagnética quando o MARE aditado com ferrita de Ba é posicionado sobre uma placa 100% refletora, é o mesmo relatado para a ferrita de MnZn, ou seja, se baseia na obtenção de uma espessura elétrica do MARE de $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda.

5 Conclusões

5.1 Sobre a ferrita de MnZn

Em todas as faixas de tamanhos de partícula estudadas do MARE aditado com ferrita de MnZn, $\phi < 38 \mu\text{m}$, $38 \mu\text{m} < \phi < 75 \mu\text{m}$ e $75 \mu\text{m} < \phi < 150 \mu\text{m}$, foram obtidos valores idênticos de $E_{r\text{-livre}}$, E_t e E_a , entre 8 e 12 GHz. As medidas na mesma frequência das faixas limítrofes de tamanho de partícula, ou seja, $\phi < 38 \mu\text{m}$ e $75 \mu\text{m} < \phi < 150 \mu\text{m}$, apresentaram diferenças entre elas de no máximo 0,026 dB, que é menor que a sensibilidade do aparelho (0,05 dB), isto é, a aparelhagem utilizada não possui sensibilidade para detectar diferenças na resposta eletromagnética entre os tamanhos de partículas estudados.

As caracterizações eletromagnéticas entre 8-12 GHz demonstraram que quanto maior a concentração de ferrita MnZn, mais refletor torna-se o MARE ($E_{r\text{-livre}}$ aumenta) e menor é a energia transmitida (E_t), conseqüentemente, maior é a energia absorvida (E_a). A reflexão aumenta desde 26% até 50%, a transmissão diminui de 70% para 32% e a absorção aumenta de 2% para 18%, em média (8-12 GHz), conforme aumenta a concentração de ferrita no MARE processado de 0:10 para 7:10, respectivamente.

Nas medidas realizadas com os MARE colocados sobre um metal 100% refletor, observa-se uma inversão no comportamento da reflexão. O MARE passa a refletir menos quando aumenta a concentração de ferrita ($E_{r\text{-placa}}$), reduzindo de 82% para 16% entre as relações 1:10 e 7:10, respectivamente, na faixa de frequências de 8 a 12 GHz, devido às múltiplas reflexões que acontecem no interior do MARE como, também, pelo efeito do cancelamento da onda pela inversão da fase em 180° , obtida pela espessura elétrica do MARE de $\lambda/4$, ambos provocados pela reflexão da onda eletromagnética promovida pelo metal sob o MARE.

5.2 Sobre a ferrita de Ba

O MARE obtido com a ferrita de Ba exibe valores até 7 pontos percentuais maiores, em média, de reflexão ($E_{r\text{-livre}}$), 10 pontos percentuais maiores, de transmissão (E_t) e 5 pontos percentuais menores de absorção (E_a), em relação ao MARE aditado com a ferrita de MnZn, na faixa de 8 a 12 GHz, com o mesmo comportamento dos parâmetros $E_{r\text{-livre}}$, E_t e E_a . Assim, quanto maior a concentração de ferrita, mais refletor

se torna o material, menor é a energia transmitida e maior é a energia absorvida. A reflexão aumenta de 26% para 45%, a transmissão diminui de 70% para 42% e a absorção aumenta de 2% para 13%, conforme aumenta a concentração de ferrita de 0:10 para 7:10, respectivamente.

Nas medidas realizadas com os MARE sobre um metal 100% refletor foi observado o mesmo mecanismo de atenuação da onda eletromagnética observado para o MARE processado com a ferrita MnZn, isto é, as múltiplas reflexões que acontecem no interior do MARE e o efeito do cancelamento da onda pela inversão da fase em 180° , obtida pela espessura elétrica do MARE de $\lambda/4$, ambos provocados pela reflexão da onda eletromagnética promovida pelo metal sob o MARE.

Os MARE aditados com ferrita de Ba observa-se uma redução da refletividade do material ($E_{r-placa}$), de 92% para a relação 1:10, para 34% para a relação 7:10, em média, na faixa de frequências de 8 a 12 GHz, mas com valores de reflexão 18 pontos percentuais maiores em relação ao observado para a ferrita de MnZn.

6 Sugestões para trabalhos futuros

1. Medir os parâmetros $E_{r\text{-livre}}$, $E_{r\text{-placa}}$, E_t e cálculo de E_a de MARE aditado com ferritas MnZn e Ba em outras concentrações e espessuras.
2. Medir os valores complexos de permissividade e permeabilidade dos MARE aditados com ferritas MnZn e Ba.
3. Realizar estudos do espectro Mössbauer da ferrita de MnZn com os seguintes tamanhos de partículas: $\phi < 37\mu\text{m}$ ($\phi < 400$ mesh), $38\mu\text{m} < \phi < 75\mu\text{m}$ (400 mesh $< \phi < 200$ mesh) e $75\mu\text{m} < \phi < 150\mu\text{m}$ (200 mesh $< \phi < 100$ mesh), bem como da ferrita de Ba com tamanho de partículas $\phi < 38\mu\text{m}$ ($\phi < 400$ mesh).

7 Produção técnico-científica gerada durante o trabalho

- 1) SIMÕES, R.; REZENDE, M.C; NOHARA, E.L. Materiais absorvedores de radiação eletromagnética (8-12 GHz) baseados em aditivos magnéticos. I Workshop Universidade-Empresa em Automação, Energia e Materiais. Anais de Congresso. Universidade de Taubaté, 5-6 de novembro de 2004.

- 2) SIMÕES, R.; REZENDE, M.C.; NOHARA, E.L. Materiais absorvedores de radiação eletromagnética (8-12 GHz) baseados em ferritas MnZn. 1st International Congress University-Industry Cooperation – UNINDU 2005, 11-15 de setembro de 2005.

8 Referências bibliográficas

ACHER, O., ADENOT, A. L. **Bounds on the dynamic properties of magnetic materials**. Physical Review B, v. 62, n. 17, 11.324-11.327, 2000.

AIRPOWER, **Programmstatus Eurofighter 3Q/2004**, acessado e disponível em http://www.airpower.at/news04/1007_efprog/, maio/2005.

AIYAR, R. P. R. C. Microwave absorbers based on hexaferrites. **Microwave and Optica Techonology Letters**. V. 23, n. 5, p. 321-323, 1999.

ALONSO, M. FINN, E. J., **Física um curso universitário** – v.1, ed. Edgard Blücher Ltda., São Paulo, 1972

AULOCK, W. H. **Handbook of microwave ferrite materials**. New York: Academic Press Inc., 1965.

AVIATION, acessado e disponível em <http://faq.bigip.mine.nu:8008/index.php>, maio/2005.

BALANIS, C. A. **Advanced engineering eletromagnetics**. New York: John Wiley Sons, 1997.

BOBER, K.; GILES, R. H.; WALDMAN, J. **Tailoring the Microwave Permittivity and Permeability of Composite Materials**, International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 18, 101, 1997.

BRYTE. Bryte Technologies Inc., **Advanced composite materials**, Disponível em: <http://www.brytetech.com> Acessado em 2004.

BURGOV, N. A., SKLYAREVSKI, V.V. **Efeito mossbauer**. Moscow: Moscow, 1969.

CABOT Co. **Technical Report S-39: Conduive Carbon Black in Plastics**. USA, 1998.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais, Uma Introdução**. 5ª. edição. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 2002, 589p.

CHO, S. B.; KANG, D. H.; OH, J. H. **Relationship between magnetics properties and microwave absorbing characteristics of NiZnCo ferrites composites**. Journal of Materials Science. V. 31, p. 4719-4722, 1996.

CYTECFIBERITE. Catálogo Cytecfiberite. **East Technology Circle Tempe**, Arizona, 1998.

DIAS, J. C. **Obtenção de revestimentos absorvedores de radiação eletromagnética (2-18 GHz)**. 2000. 136f.. Tese (Doutorado em Ciência) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos.

DIXON, P., **Dampening Cavity resonance using absorber material**, RFDesign, 16-20, Maio/2004, acessado e disponível em <http://www.rfdesign.com>.

ESPAÇO CIENTÍFICO E CULTURAL, acessado e disponível em <http://www.ecientificocultural.com>, maio/2005.

ERADS, Expert Radar Signature Solutions. **Material Dielectric Properties**. University of Massachusetts Lowell, Submillimeter-Wave Technology Laboratory, acessado e disponível em <http://stl.uml.edu/stlweb/materialslist.html>, novembro 2004.

GEAR, J. T. **Microwave absorbers manage military electronics RF interference**. RF Design. Acessado em Outubro de 2004. Ed. August 1, 2004. Disponível em http://rfdesign.com/mag/radio_microwave_absorbers_manage/

GIANNAKOPOULOU, T., KOMPOTIATIS, L., KONTOGEORGAKOS, A., KORDAS, G. **Microwave behavior of ferrites prepared via sol-gel method**. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 246, 360-365, 2002.

GIANNAKOPOULOU, T., KONTOGEORGAKOS, A., KORDAS, G. **Single-layer microwave absorbers: influence of dielectric and magnetic losses on the layer thickness**. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 263, 173-181, 2003.

GORSHENEV, V. N.; BIBIKOV, S. B.; SPECTOR, V. N.; **Simulation, synthesis and investigation of microwave absorbing composite materials**; Synthetic Metals; v. 86; p. 2255-2256; 1997.

HEXCEL . United States: **Hexcel Corporation**. Folder informativo, 1997.

KONIMPEX, website em <http://www.konimpex.com.pl/>, acessado em maio/2005.

JOHNSON, R. N. **Radar-Absorbing Material: A Passive Role in an Active Scenario**. The International Countermeasure Handbook. Palo Alto, 1992. 11. ed., disponível em <http://www.randf.com>, acessado em maio/2005.

LAX, B.; BUTTON, K. J. **Microwave Ferrites and Ferrimagnetics**. McGraw-Hill Book Company, Inc., 1962.

LEE, S. M.; **International Encyclopedia of Composites**. New York: VHC Publishers, p. 404-430, v.6, 1991.

LIU, C. C.; WALTERS, A. B.; VANNICE, M. A.; **Measurement of electrical properties of a carbon black**, Carbon, v. 33, n. 13, p.1699-1708, 1995.

MAOSHENG, C., RURU, Q., CHENGJUN, Q., JING, Z. **Matching design and mismatching analysis towards radar absorbing coatings based on conducting plate**. Materials and Design, v.24, p. 391-396, 2003a.

MAOSHENG, C., JIE, Y., HAITAO, L., XIAOYONG, F., JING, Z. **A simulation of the quasi-standing wave and generalized half-wave loss of electromagnetic wave in non-ideal media**. Materials and Design, v. 24, p. 31-35, 2003b.

MIACCI, M. A. S. **Determinação experimental do espalhamento monoestático de microondas por alvos de geometrias simples**. 2002. Dissertação (Mestrado em Ciência) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos.

MÖSSBAUER, R. **Kernresonanzfluoreszenz von Gammastrahlung in Ir191**. Z. Physik 151, p. 124-143, 1958.

NAKAMURA, T; TSUTAOKA, T; HATAKEYAMA, K.; **Frequency dispersion of permeability in ferrite composite materials**, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, v. 138; p. 319-328; 1994.

NALWA, H. S., **Handbook of conductive molecules and polymers**, v.3, Conductive polymers: Spectroscopy and physical properties, p. 376. John Wiley and Sons Ltda, 1997.

NOHARA, E. L.; MARTIN, I. M.; REZENDE, M. C. São José dos Campos. CTA – Centro Técnico Aeroespacial. São José dos Campos. **Processamento de ferritas à base de Bário (Ba), Chumbo (Pb), Cobalto (Co), Cromo (Cr), Escândio (Sc), Manganês (Mn), Níquel (Ni), Titânio e Zinco (Zn) pelo processo de metalurgia do pó, visando aplicações de blindagem eletromagnética na faixa de 2-40 GHz nas áreas aeroespacial e afins**. INPI 9907616. Depósito: 20/13/1999a.

NOHARA, E. L.; MARTIN, I. M.; REZENDE, M. C. São José dos Campos. CTA – Centro Técnico Aeroespacial. São José dos Campos. **Processamento de Materiais Absorvedores de Radiação Híbridos Utilizando Mantas Poliméricas, Colméias, Espumas e Tintas Aditadas com Ferritas de Bário (Ba), Chumbo (Pb), Cobalto (Co), Cromo (Cr), Escândio (Sc), Manganês (Mn), Níquel (Ni), Titânio (Ti) e Zinco (Zn) e/ou Partículas de Negro de Fumo e/ou Grafite, na Faixa de 1 GHz a 40 GHz**. PI9907629. Data do depósito: 20/13/1999b.

NOHARA, E. L.; MARTIN, I. M.; REZENDE, M. C. São José dos Campos. CTA – Centro Técnico Aeroespacial. São José dos Campos. **Processamento de materiais absorvedores de radiação eletromagnética isotrópicos e anisotrópicos, utilizando matrizes poliméricas e partículas esféricas e/ou filamentos de óxido de ferro policristalino, com valências II e III, na faixa de 1 a 20 GHz**. INPI0006540. Depósito: 21/13/2000.

NOHARA, E. L.; MARTIN, I. M.; REZENDE, M. C. São José dos Campos. CTA – Centro Técnico Aeroespacial. São José dos Campos. **Processamento de materiais absorvedores de radiação eletromagnética constituídos de mantas flexíveis ou artefatos rígidos, maciços ou porosos, com acabamentos superficiais liso ou irregular, tipos: estriado, cônico ou piramidal, utilizando matrizes poliméricas aditadas com ferritas e/ou negro de fumo e/ou grafite e/ou polímeros condutores, na faixa de 1 a 20 GHz**. INPI 0100772-6. Depósito: 20/02/2001a.

NOHARA, E.L. et. al. São José dos Campos. CTA – Centro Técnico Aeroespacial. São José dos Campos. **Método de medida de seção reta radar de objetos refletoras de ondas eletromagnéticas na faixa de 1 GHz a 100 GHz para caracterização eletromagnética de materiais absorvedores de radiação**. INPI-MU8102042-2. Data de depósito: 02/06/2001b.

NOHARA, E.L. **Materiais Absorvedores De Radiação (8-13 GHz) Obtidos pela Combinação de Compósitos Avançados Dielétricos e Revestimentos Magnéticos**. Tese (Doutorado em Ciências), Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos. agosto de 2003.

PARDAVI-HORVATH, M. **Microwave Applications of soft ferrites**. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, v. 215-216; p.171-183; 2000.

PERSEUS, **Foam Type Microwave Absorber**, acessado e disponível em <http://www.p-live.com>, maio/2005a.

PERSEUS, **Rubber Type Microwave Absorber**, acessado e disponível em <http://www.p-live.com>, maio/2005b.

POLDER, D.; SMIT, J. **Resonance Phenomena in Ferrites**. Reviews of Modern Physics; v.25, n.1, p.89-90, 1953.

R&F PRODUCTS, **RF microwave absorber**, acessado e disponível em http://www.randf.com/rf_mag.html, maio/2005.

REITZ, John R., **Fundamentos da teoria eletromagnética**, 3.ed.[S.I.]: Campus, 1982. 516p.

SILVA, F. S. **Obtenção de Estruturas Híbridas Absorvedoras de Radiação Eletromagnética na Faixa de Microondas Aplicadas no Setor Aeronáutico (8-13 GHz)**. 2000. 107f.. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos.

SINGH, P.; BABBAR, V. K.; RAZDAN, A.; SRIVASTAVA, S. L.; GOEL, T. C., **Microwave absorption studies of Ca-NiTi hexaferite composites in X-band**, Materials Science and Engineering, B78, 70-74, 2000

SLATER, J. C., **Electromagnetism**. 1.ed. [S.I.]: Mcgraw-Hill, 1947. 240p.

SNOEK, J. L.; **Physica**, XIV, v.4, p.207, 1948.

SOOHOO, R. F., **Theory and application of Ferrites**. 1.ed.: Prentice-Hall, 280 p., 1960

THOSTENSON, E. T., CHOU, T.-W., **Microwave processing: fundamentals and applications**, Composites: Part A, 30, 1055-1071, 1999.

UFIMTSEV, P. Y. Proceedings of the IEEE. **Comments on Diffraction Principles and Limitations of RCS Reduction Techniques**. v. 84, n. 13, p. 1828-1851, 1996.

YUSOFF, A. N., ABDULLAH, M. H., AHMAD, S. H., JUSOH, S. F., MANSOR, A. A., HAMID, S. A. A. **Eletromagnetic and absorption properties of some microwave absorbers**, Journal of Applied Physics, v. 92, n. 2, p. 876-882, 2002.

9 Anexos

ANEXO A – ANÁLISE QUÍMICA DA FERRITA DE BÁRIO

A Figura A.1 relaciona uma análise química qualitativa, realizada por EDS (energia dispersiva de raios X) no microscópio eletrônico de varredura. Pela Figura A.1 pode-se observar a presença dos seguintes elementos químicos: ferro, oxigênio, bário, cromo e cobalto. O fabricante havia informado que a ferrita era constituída somente do elemento químico bário, entretanto, há presença de cromo e cobalto na formulação. Assim foi realizada um análise química quantitativa, por espectroscopia de absorção atômica.

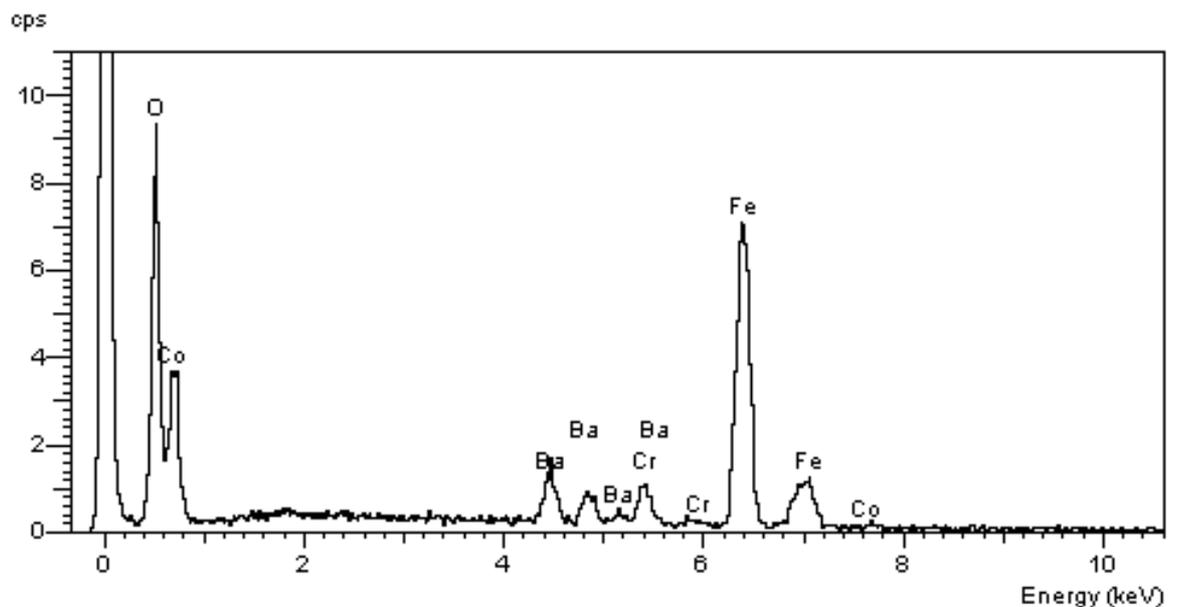


Figura A.1. Análise química qualitativa da ferrita de Ba por EDS (energia dispersiva de raios-X)

A Tabela A.1 relaciona as porcentagens em massa encontradas na ferrita de Ba, obtidas por espectrofotometria de absorção atômica. A porcentagem em massa do oxigênio foi obtida pela diferença com os outros elementos químicos presentes na ferrita.

Tabela A.1 – Porcentagem em massa dos elementos químicos que compõem a ferrita de Ba

Elemento químico	Massa, %
Ferro	58,8
Bário	15,6
Cromo	0,22
Cobalto	0,10
Oxigênio	25,3

Autorizo cópia total ou parcial desta obra, apenas para fins de estudo e pesquisa, sendo expressamente vedado qualquer tipo de reprodução para fins comerciais sem prévia autorização específica do autor.

Roberto Simões

Taubaté, junho de 2005.