

Valdirene Aparecida da Silva
Institute of Aeronautics and Space
São José dos Campos - Brazil
valapsilva@yahoo.com.br

José Jesus Pereira
University of Taubaté
Taubaté – Brasil
jesusp_99@yahoo.com.br

Evandro Luís Nohara
University of Taubaté
Taubaté – Brasil
evandro@unitau.br

Mirabel Cerqueira Rezende*
Institute of Aeronautics and Space
São José dos Campos - Brazil
mirabel@iae.cta.br

* author for correspondence

Comportamento eletromagnético de materiais absorvedores de micro-ondas baseados em hexaferrita de Ca modificada com íons CoTi e dopada com La

Resumo: *Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética (MARE) são compostos que absorvem a radiação eletromagnética incidente em determinadas faixas de frequências e a dissipam sob a forma de calor. Esses materiais são obtidos a partir do processamento adequado de matrizes poliméricas incorporadas com compostos que atuam como centros absorvedores da radiação incidente, na faixa de micro-ondas. Este trabalho mostra a avaliação eletromagnética de MARE processados pelo uso de uma hexaferrita de cálcio modificada pela incorporação dos íons CoTi e La. A substituição realizada pelos íons mencionados mostra, via análises de MAV, que a ferrita apresenta baixos valores de magnetização de saturação ($123,65 \text{ Am}^2/\text{kg}$) e de campo coercitivo ($0,07 \text{ T}$), indicando o seu amolecimento. Amostras de MARE preparadas com diferentes concentrações desta hexaferrita ($40 - 80\%$ em massa) apresentam mudanças nos parâmetros complexos de permeabilidade e permissividade e no desempenho da atenuação da radiação incidente. Valores de atenuação da radiação incidente entre 40 e 98% são obtidos.*

Palavras-chave: *Materiais absorvedores de radiação, Caracterização eletromagnética, Hexaferrita, Refletividade.*

Electromagnetic behavior of radar absorbing materials based on Ca hexaferrite modified with Co-Ti ions and doped with La

Abstract: *Radar Absorbing Materials (RAM) are compounds that absorb incidental electromagnetic radiation in tuned frequencies and dissipate it as heat. Its preparation involves the adequate processing of polymeric matrices filled with compounds that act as radar absorbing centers in the microwave range. This work shows the electromagnetic evaluation of RAM based on CoTi and La doped Ca hexaferrite. Vibrating Sample Magnetization analyses show that ion substitution promoted low values for the parameters of saturation magnetization ($123.65 \text{ Am}^2/\text{kg}$) and coercive field (0.07 T) indicating ferrite softening. RAM samples obtained using different hexaferrite concentrations ($40-80$ per cent, w/w) show variations in complex permeability and permittivity parameters and also in the performance of incidental radiation attenuation. Microwave attenuation values between 40 and 98 per cent were obtained.*

Keywords: *Radar absorbing materials, Electromagnetic characterization, Hexaferrite, Reflectivity.*

INTRODUÇÃO

Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética (MARE) – em inglês tradicionalmente conhecidos como RAM – *Radar Absorbing Materials* – são materiais constituídos por compostos que proporcionam perdas de energia da radiação eletromagnética. Em determinadas faixas de frequências, esses materiais atenuam a radiação

da onda eletromagnética incidente e dissipam a energia absorvida sob a forma de calor, por meio de mecanismos internos, magnéticos e/ou dielétricos. Esses mecanismos de perdas podem ser de naturezas física, química ou, simultaneamente, ambas (Dias, 2000; Nohara, 2003; Folgueras, 2005; Hallynck, 2005; Pereira, 2007).

Considerando-se aplicações desses materiais no setor militar, pode-se dizer que a energia espalhada por um alvo (eco-radar), que seria utilizada para a sua detecção por

Received: 20/09/09

Accepted: 06/11/09

meio de um radar, é atenuada e o objeto revestido com MARE torna-se mais difícil de ser detectado ou, como divulgado na literatura, “invisível” ao radar. No setor civil da sociedade muitas são as aplicações de MARE, podendo-se citar seus benefícios de uso nas áreas de telecomunicações, no revestimento de aparelhos celulares e antenas de rádio-transmissão; médica, por exemplo, no revestimento de marcapassos; eletrônica, no revestimento de câmaras anecóicas utilizadas em setores de pesquisa e de controles industriais; de eletrodomésticos em geral, na blindagem eletromagnética e no controle de interferências, entre outras aplicações (Pinho et al., 1999 e Nohara, 2003).

Os materiais absorvedores são materiais compósitos normalmente utilizados como recobrimentos, os quais podem apresentar-se de várias formas, como placas elastoméricas de polímeros à base de poliisopreno e policloropreno; mantas flexíveis de diferentes tipos de borrachas; tintas à base de resinas epoxídicas, fenólicas e poliuretânicas e espumas de precursores naturais e sintéticos (Gupta et al., 1994; Dias, 2000).

A possibilidade de ajustar as propriedades elétricas e magnéticas desses materiais, de tal forma a otimizar a atenuação das micro-ondas incidentes, em frequências específicas ou em um amplo espectro de frequências, é uma das características mais importantes desses compósitos. Também são características relevantes e continuamente investigadas na área de MARE: a durabilidade, baixa densidade, baixo custo, o desempenho em uma ampla faixa de frequências e, também, a facilidade de aplicação (Pinho et al., 1999; Petrov e Gagulin, 2001; Paulo et al., 2004 e Yusoff e Abdullah, 2004). Os materiais absorvedores podem apresentar-se como ressonantes, ou seja, materiais que atuam em banda estreita de frequências ou, ainda, como absorvedores tipo banda larga, também denominados de absorvedores intrínsecos, que atuam em faixas mais largas de frequências.

O primeiro material magnético conhecido pelo homem foi a magnetita, Fe_3O_4 , que ficou conhecida como ferrita de ferro. Em 1948, Néel (*in* Lax e Button, 1962) apresentou uma quantidade de fenômenos básicos de interação *spin-spin*, que ocorria nas ferritas. As ferritas constituem uma classe muito importante de materiais magnéticos, por conterem íons magnéticos arranjados, que podem gerar magnetização espontânea, enquanto mantêm boas propriedades dielétricas. Ferritas são usualmente obtidas por síntese estequiométrica de misturas de certos óxidos metálicos em altas temperaturas (1000 a 1500°C) (Von Aulock, 1965; Meshram et al., 2003 e Ribeiro, 2006).

As propriedades magnéticas das ferritas estão relacionadas com os elétrons da camada incompleta dos íons do metal de transição. O elétron gera um campo magnético em torno

do átomo e do seu próprio eixo denominado *spin*, esses movimentos geram um campo magnético, denominado dipolo magnético. As perturbações causadas pelos dipolos magnéticos caracterizam o momento magnético. A interação dos momentos magnéticos induzidos por um campo magnético externo aplicado resulta nas propriedades magnéticas macroscópicas dos materiais (Paulo, 2006). A soma desses momentos dá o momento magnético do átomo (Nedlov, Milenova e Dishivsky, 1994; Meshram et al., 2003; Nohara, 2003).

As ferritas podem ser consideradas como os “centros de absorção” de radiação eletromagnética mais antigos e mais utilizados na tecnologia de processamento de MARE.

O desenvolvimento de ferritas hexagonais tem recebido significativa atenção, visando a sua aplicação no processamento de materiais absorvedores de micro-ondas, que atendem a faixa de frequências de 1-100 GHz (Horvath, 2000; Petrov e Gagulin, 2001). Devido às suas características de magnetização permanente, as ferritas hexagonais recebem a denominação de materiais duros, enquanto que as ferritas espinélio e granada, por sua vez, por possuírem elevada permeabilidade e facilidade de magnetização, sob a influência de um campo magnético externo, possuem a designação de materiais moles (Cabral, 2005; Lima, 2007). As ferritas duras são compostas, normalmente, por óxidos férricos e óxidos de bário, cálcio, estrôncio ou chumbo, normalmente na proporção de $MeO_6Fe_2O_3$ (ferrita tipo M), embora existam outras estequiometrias como, $BaM_2Fe_{16}O_{27}$ (tipo W), $Ba_2M_2Fe_{12}O_{22}$ (tipo Y) e $Ba_3M_2Fe_{24}O_{41}$ (tipo Z), onde Me representa um metal de transição dopante de valência (II) (Horvath, 2000; Cabral, 2005).

Atualmente, com o objetivo de melhorar o desempenho das ferritas como centros absorvedores de radiação eletromagnética, a substituição de íons tem sido largamente estudada, de modo a ajustar a ferrita à faixa de frequências de interesse de aplicação do material absorvedor. Cátions metálicos ou a combinação de cátions podem diminuir a anisotropia magnetocristalina, proporcionando às ferritas novas propriedades com variadas aplicações (Bueno, 2003; Lima, 2007; Paulo, 2006). Aplicações eletrônicas requerem do material o controle das propriedades magnéticas, como homogeneidade, tamanho e formato das partículas, dependência da coercividade (H_c) em função da temperatura e polarização (Lima, Leandro e Ogasawara, 2003; Rewatkar, Patil e Gawali, 2005; Sláma et al., 2005).

Íons como Co^{2+} e Ti^{4+} são bons substituintes em hexaferritas, por promoverem a redução do campo anisotrópico, diminuir H_c , sem causar uma redução significativa da polarização magnética, possibilitando seu uso como centro

absorvedor no processamento de MARE em faixas mais baixas de frequências (Zhou et al., 1994; Rewatkar, Patil e Gawali, 2005). Hexaferritas apresentam normalmente ressonância natural em altas frequências, acima de 45 GHz, como mostra a literatura (Michalikovh et al., 1994).

A literatura mostra, também, que os parâmetros de hexaferritas de Ca e Ba podem ser modificados pela substituição de íons Fe^{3+} por outros cátions ou por cátions combinados como Co-Ti, Zn-Ti, Zn-Sn, Co-Sn, Ni-Zr e Co-Mo (Horvath, 2000; Petrov e Gagulin, 2001; Feng e Jen, 2002; Haijun et al., 2002; Qiu, Zhang e Mu, 2005).

Estudos de substituição dos íons Fe^{3+} e Ba^{2+} em hexaferritas de Ba por íons combinados Zn-Sn, Co-Sn, Ni-Zr e Co-Mo têm mostrado bons resultados na variação das propriedades magnéticas da ferrita de bário (Qiu, Zhang e Mu, 2005). A hexaferrita de bário é um material magnético duro com elevada saturação de magnetização, alta coercividade, campo anisotrópico magnético elevado e excelente estabilidade química. Nesse sentido, a substituição do Ba^{2+} por La^{3+} tem apresentado bons resultados por promover o amolecimento da hexaferrita e manter a estabilidade da mesma.

Como já mencionado, as hexaferritas do tipo M apresentam a proporção $\text{MeO}_6\text{Fe}_2\text{O}_3$, onde Me é um metal alcalino terroso Ba, Ca, Sr ou Pb, de estrutura complexa, mas de apenas um eixo c, que é um eixo de fácil magnetização em sua estrutura básica. Magnetização essa que não pode ser alterada para outros eixos, devido às suas características de materiais duros (Narang e Hudíara, 2006; Rewatkar, Patil, Gawali, 2005; Sláma, et al., 2005).

Nesse sentido, visando contribuir para a consolidação da área de processamento de MARE no IAE, pelo uso de novas formulações de ferritas, este trabalho mostra o estudo da caracterização eletromagnética (medidas de permissividade, permeabilidade e refletividade), na faixa de 8,2 a 12,4 GHz, de absorvedores preparados pelo uso de uma hexaferrita de Ca, $[\text{Ca}(\text{CoTi})_{0,2}\text{Fe}_{11,6}\text{O}_{19}]_{96,0}[\text{La}_2\text{O}_3]_{4,0}$, intencionalmente modificada com íons CoTi e La, de modo a favorecer a sua atuação como centro absorvedor de micro-ondas na banda X.

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

O presente trabalho utilizou uma hexaferrita de Ca de fórmula $[\text{Ca}(\text{CoTi})_{0,2}\text{Fe}_{11,6}\text{O}_{19}]_{96,0}[\text{La}_2\text{O}_3]_{4,0}$. Esta hexaferrita foi preparada neste estudo com a incorporação intencional dos íons CoTi e La, na empresa Sontag/SP. Essa amostra foi obtida com sucesso pelo processo de

metalurgia do pó, conforme procedimento descrito na literatura (Singh et al., 1999).

Preparação dos corpos-de-prova

Para a preparação dos corpos-de-prova de MARE foi utilizada uma matriz polimérica epoxídica bicomponente, do tipo Araldite Profissional, da CIBA. Os corpos-de-prova de MARE foram preparados pela mistura de 40, 50, 60, 70 e 80% em massa da hexaferrita na resina e vazados em moldes metálicos de latão de (23 x 11 x 10) mm^3 , obtidos do próprio trecho de guia de ondas utilizado na caracterização eletromagnética. Este procedimento foi adotado para garantir o encaixe perfeito do corpo-de-prova no guia de ondas, sem a presença de vãos entre as paredes desse dispositivo e a amostra. Assim, todos os corpos-de-prova obtidos apresentavam medidas exatas às dimensões internas do guia de ondas, eliminando, assim, possíveis erros na caracterização eletromagnética.

A definição das espessuras dos corpos-de-prova para estas medidas foi baseada na metodologia de Nicolson Ross (ASTM, 2008), detalhadamente descrita por Pereira (Pereira, 2007). O ajuste das espessuras dos corpos-de-prova foi realizado por lixamento manual e o controle desse parâmetro e do paralelismo das faces foi realizado com um paquímetro. A cura dos corpos-de-prova ocorreu à temperatura ambiente, por 24 h.

Medidas de Magnetização

As medidas de magnetização da hexaferrita preparada foram realizadas por meio de um equipamento tipo Magnômetro de Amostra Vibrante (MAV). A análise foi realizada diretamente no pó da ferrita obtida. O MAV utilizado foi montado e desenvolvido no Laboratório de Magnetismo e Materiais Magnéticos (LMMM) do Departamento de Física Teórica e Experimental (DFTE) da UFRN/Natal.

Caracterização Eletromagnética

A caracterização dos corpos-de-prova de MARE foi realizada por duas metodologias diferentes. A primeira envolveu medidas dos parâmetros S (S_{11} , S_{21} , S_{12} e S_{22}), a partir dos quais foram calculados os valores de permeabilidade e permissividade complexas, conforme norma ASTM (ASTM, 2008) e a segunda envolveu medidas de refletividade com placa metálica. Ambas as medições foram realizadas pelo uso de guia de ondas retangular, conhecido como “Método de Linha de Transmissão” ou “Método de Transmissão/Reflexão

por Ondas Guiadas”, na faixa de frequências de 8,2 a 12,4 GHz (banda X). Para isto, foi utilizado um analisador de redes vetorial (Network Analyser System), modelo 8510C, da antiga empresa HP, atual Agilent Technologies, equipado com *kit* de calibração WR 90. Todo o equipamento de caracterização foi devidamente calibrado antes da realização das medidas. Os valores obtidos de permeabilidade, permissividade e refletividade apresentam uma incerteza calculada de +/- 0,5%. Nas medidas de refletividade, parâmetro S_{11} , o corpo-de-prova de MARE foi acondicionado no porta-amostra sobre uma placa metálica de alumínio (condutora), que é tida como a referência, ou seja, material 100% refletor.

Os parâmetros S são definidos em uma matriz que contém informações sobre as propriedades de espalhamento das ondas eletromagnéticas, onde S_{11} e S_{22} representam a energia refletida e S_{12} e S_{21} a energia transmitida (Pereira, 2007). De acordo com o princípio de conservação de energia, a onda eletromagnética incidente no material, E_i , e sua energia, pode ser total ou parcialmente refletida (E_r), atenuada (E_a), ou transmitida (E_t). Esta última representa a energia que passa através da estrutura do material e não é absorvida ou refletida (Folgueras, 2005; Nohara, 2003; Pereira, 2007). A Equação 1 representa o somatório das energias refletida, transmitida, absorvida e dissipada (E_d).

$$E_i = E_r + E_t + E_a + E_d \quad (1)$$

A Figura 1 (Pereira, 2007) apresenta, esquematicamente, as variáveis relacionadas com a interação da onda eletromagnética-MARE dentro do dispositivo utilizado no método de linha de transmissão.

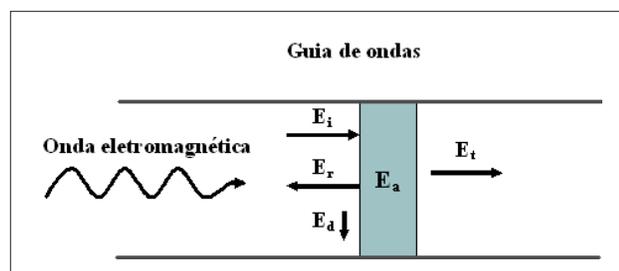


Figura 1: Esquema do dispositivo utilizado no método de linha de transmissão, em guia de ondas. E_i – Energia incidente, E_r – Energia refletida, E_t – Energia transmitida, E_d – Energia dissipada, E_a – Energia absorvida pelo material (Pereira, 2007).

A refletividade é a relação entre a energia eletromagnética refletida pelo material e a energia incidente no material e é expressa em dB (decibel - 1 décimo de um bel), representada na Equação 2 (Pereira, 2007). A relação entre a atenuação em dB e a porcentagem da radiação eletromagnética absorvida (energia absorvida pelo material) é apresentada na Tabela 1 (Lee, 1991).

Tabela 1: Relação entre refletividade e a porcentagem da energia absorvida (Lee, 1991).

Atenuação da radiação (dB)	Absorção da radiação incidente (%)
0	0
-3	50
-10	90
-15	96,9
-20	99
-30	99,9
-40	99,99

$$\text{Refletividade (dB)} = \log_{10} E_r/E_i \quad (2)$$

A espessura dos corpos-de-prova para as determinações da permeabilidade e permissividade, a partir dos parâmetros S, segundo o modelo de Nicolson-Ross, deve estar no intervalo de espessuras elétricas (λ_g) entre $\lambda_g/18$ e $\lambda_g/2$, que representa de 20° a 180° de fase do comprimento de onda guiada no interior do corpo-de-prova, respectivamente (ASTM, 2008; Agilent Technologies, 2005b; Pereira, 2007), sendo a espessura elétrica ótima igual a $\lambda_g/4$ (90°). É importante evitar uma espessura que promova o cancelamento de fases da onda eletromagnética, pois isso induz erros no algoritmo de Nicolson-Ross para o cálculo dos valores de permeabilidade e permissividade. Por esse motivo, foi realizada uma varredura de espessuras (3,0-10 mm, em passos de 0,1 mm) para cada concentração de hexaferrita na amostra, a fim de verificar se ocorria cancelamento de fases, bem como obter valores de espessuras próximos de $\lambda_g/4$, para a obtenção dos parâmetros permeabilidade e permissividade, na faixa de frequências entre 8,2 – 12,4 GHz. Os valores ótimos de espessuras são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Valores das espessuras das amostras para a determinação dos parâmetros S e utilizados nos cálculos dos valores de permeabilidade e permissividade, segundo o modelo de Nicolson-Ross.

Concentração de hexaferrita na resina epóxi (% em massa)	Espessura (mm)
40	4,47
50	4,75
60	3,45
70	3,40
80	3,05

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Medidas magnéticas

A Figura 2 apresenta a curva de histerese da hexaferrita de Ca ($[\text{Ca}(\text{CoTi})_{0,2}\text{Fe}_{11,6}\text{O}_{19}]_{96,0}[\text{La}_2\text{O}_3]_{4,0}$). Observa-se pelo gráfico que o valor de magnetização de saturação atinge $123,65 \text{ Am}^2/\text{kg}$ e o campo coercitivo (H_c) é bastante reduzido, com valor igual a $0,07 \text{ T}$. Verifica-se, ainda, a tendência de histerese com baixas perdas de energia. No entanto, sabe-se que as hexaferritas são consideradas duras e possuem elevado campo coercitivo, com ressonância natural em altas frequências, acima de 45 GHz , como mostra a literatura (Michalikovh et al., 1994). Esses resultados e as baixas perdas na inversão do campo magnético (magnetização remanescente igual a $43,73 \text{ Am}^2/\text{kg}$) indicam que a ferrita de Ca caracterizada trata-se de um material magnético mole. Assim, esses resultados confirmam que a modificação da hexaferrita de Ca, pela incorporação dos íons CoTi e La na sua estrutura, favoreceu o seu amolecimento, em concordância com a literatura (Singh, et al., 1999), deslocando, provavelmente, a sua ressonância natural para frequências mais baixas.

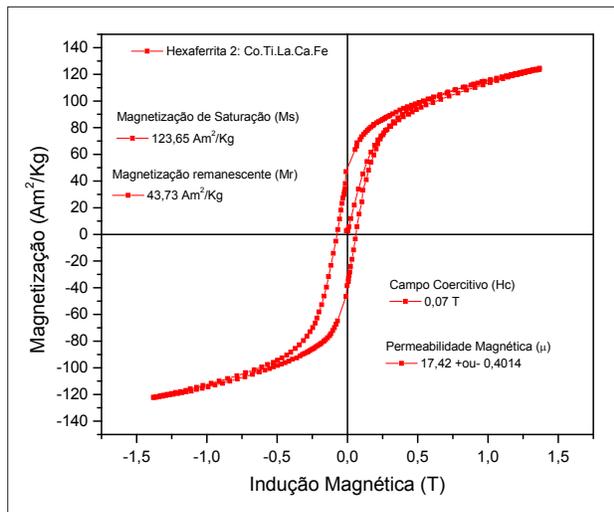


Figura 2: Medidas magnéticas da hexaferrita de Ca $[\text{Ca}(\text{CoTi})_{0,2}\text{Fe}_{11,6}\text{O}_{19}]_{96,0}[\text{La}_2\text{O}_3]_{4,0}$.

Medidas Eletromagnéticas

As medidas de permeabilidade (μ_r) e permissividade (ϵ_r) das amostras de MARE preparadas com a ferrita $[\text{Ca}(\text{CoTi})_{0,2}\text{Fe}_{11,6}\text{O}_{19}]_{96,0}[\text{La}_2\text{O}_3]_{4,0}$ são apresentadas na Figura 3. As diferentes concentrações da hexaferrita nas amostras de MARE conferem diferentes comportamentos dielétricos, uma vez que os valores de permeabilidade e permissividade complexas versus a frequência são propriedades extrínsecas das ferritas. A análise desta figura revela que o aumento da concentração de ferrita no compósito promove o aumento mais acentuado do

componente real da permissividade (ϵ_r' - componente de armazenamento) e menos significativo do componente imaginário (ϵ_r'' - componente de perdas). O comportamento verificado para as medidas de permissividade real (ϵ_r') evidencia que existe uma concordância com as curvas de refletividade medidas (Figura 4), onde a atenuação mostra um aumento gradativo com o aumento da concentração da hexaferrita no absorvedor.

A Figura 3(a) refere-se à amostra com 40% (m/m) de ferrita, com o valor de ϵ_r' igual a 4,0 em 8,2 GHz, seguido de uma queda para 3,92 no final da faixa (12,4 GHz). Já, o parâmetro ϵ_r'' apresenta valores na faixa de 0,45 – 0,73 entre 8,2 e 12,4 GHz. Os valores complexos de permissividade real e imaginária do MARE com 50% (m/m) são apresentados na Figura 3(b). Nota-se que, os resultados encontrados para ϵ_r' (4,56) não apresentam variações significativas, permanecendo praticamente constantes em toda a faixa de frequências. Já, o valor medido de ϵ_r'' varia de 0,56 – 0,77, corroborando com a literatura (Singh, et al., 1999 e Hallynck, 2005).

Quando a concentração de hexaferrita na amostra é aumentada para 60% em massa (Figura 3(c)), os valores de permissividade real e imaginária, ou seja, os valores de armazenamento e dissipação dielétrica encontram-se em torno de 5,02 e de 0,71 – 0,83, respectivamente, em toda a faixa de frequências de medidas.

A Figura 3(d) apresenta os valores de ϵ_r' e ϵ_r'' do material absorvedor de micro-ondas com 70% em massa de ferrita. A análise desta figura mostra que há, comparativamente às outras amostras discutidas, um aumento nos valores de permissividade, tanto do componente real como do imaginário (6,75 – 6,82 para ϵ_r' e 1,28 – 1,51 para ϵ_r'' , em toda a faixa de frequências). A Figura 2(e) apresenta a curva referente à amostra com 80% de hexaferrita, em massa. Observa-se que, tanto os valores de ϵ_r' como os de ϵ_r'' apresentam um aumento com o acréscimo da concentração (9,88 – 9,55 e 2,31 – 2,38, respectivamente) em toda a faixa de frequências. Os componentes complexos da permeabilidade (μ' e μ'') não apresentam variações na faixa de frequências de estudo.

A Figura 4(a) apresenta as curvas das medidas de refletividade (com placa de alumínio) das amostras de MARE com a hexaferrita de Ca modificada, nas concentrações de 40%, 50%, 60%, 70% e 80%, em massa. A linha reta em 0 dB (em preto) é representativa da placa metálica refletora (material de referência), ou seja, sem atenuação da onda eletromagnética incidente. A curva em preto representa o comportamento de refletividade da amostra com 40% da hexaferrita, em massa. As espessuras das amostras de MARE nestas medidas são as mesmas utilizadas para a determinação dos parâmetros S (Tabela 2). Observa-se

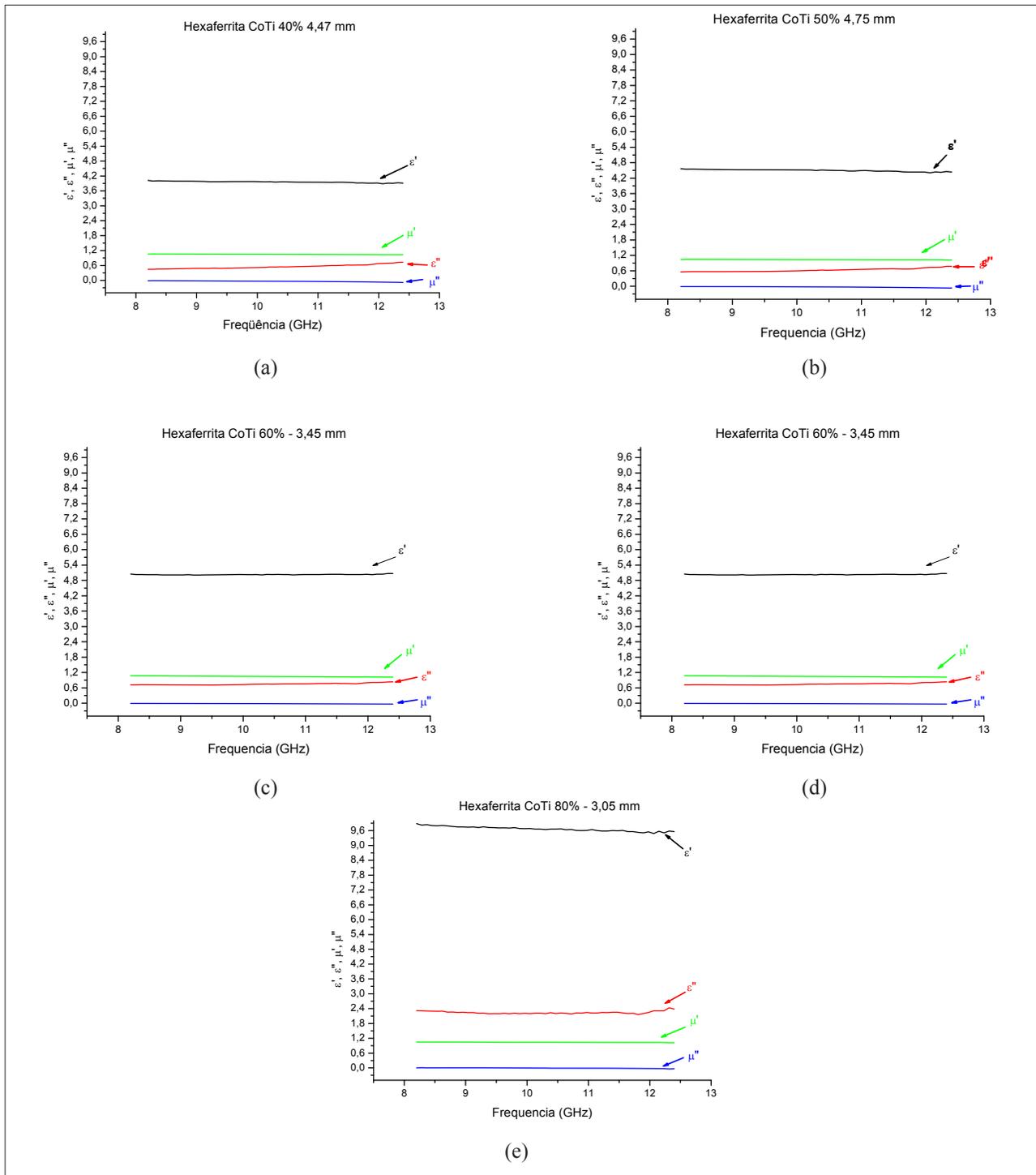


Figura 3: Medidas de permeabilidade e permissividade real e imaginária das amostras de MARE preparadas com a hexaferrita $[\text{Ca}(\text{CoTi})_{0,2}\text{Fe}_{11,6}\text{O}_{19}\text{La}_{0,6}][\text{La}_2\text{O}_3]_{4,0}$, nas concentrações de (a) 40%, (b) 50%, (c) 60%, (d) 70% e (e) 80%, em massa.

que, o valor de refletividade da onda incidente é de -5 dB em 8,3 GHz, que corresponde a, aproximadamente, 70% de atenuação da radiação incidente. Com 50% em massa de ferrita no material absorvedor, a refletividade é de -6,3 dB na frequência de 8,2 GHz ou, aproximadamente, 75% de atenuação (curva vermelha).

Aumentando-se para 60% em massa de hexaferrita no MARE, a refletividade apresenta um pico de ressonância de -5,9 dB na faixa de frequências de 9,7 – 10,4 GHz (curva verde). Um melhor desempenho do material absorvedor é verificado com o aumento da concentração da massa da ferrita para 70%. Observa-se, ainda, na

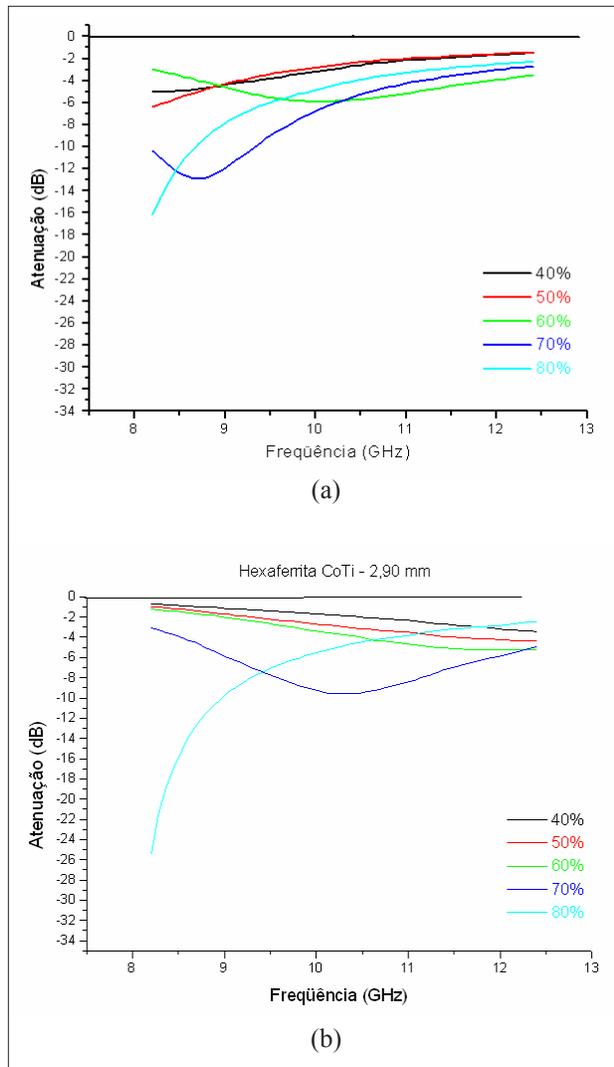


Figura 4: Curvas de refletividade do MARE contendo a hexaferrita de $[\text{Ca}(\text{CoTi})_{0,2}\text{Fe}_{11,6}\text{O}_{19,96,0}][\text{La}_2\text{O}_3]_{4,0}$, nas concentrações de 40%, 50%, 60%, 70% e 80%, em massa, nas espessuras (a) descritas na Tabela 2 e (b) de 2,90 mm.

curva em azul, que a ressonância atinge uma refletividade de -12,9 dB, em torno de 95% de atenuação da onda eletromagnética incidente, em 8,7 GHz. O aumento da concentração de hexaferrita no material absorvedor melhora o comportamento da refletividade, ou seja, melhora o desempenho do material absorvedor, pois tornam as características magnéticas e dielétricas do mesmo semelhante às de materiais policristalinos (Bueno, 2003; Lima, 2007; Paulo, 2006). Este comportamento é confirmado na curva de refletividade na cor ciano, a qual mostra uma ressonância próxima a -16,1 dB em 8,2 GHz, ou seja, aproximadamente 98% de atenuação da onda eletromagnética incidente, nota-se, também, que nesta concentração, a curva apresenta uma tendência de maior atenuação da onda em frequências mais baixas.

A Figura 4(b) apresenta as curvas das medidas de refletividade (com placa de alumínio) das amostras de MARE com 40%, 50%, 60%, 70% e 80%, em massa, da hexaferrita de Ca, na espessura de 2,90 mm. Com o decréscimo da espessura do corpo-de-prova para 2,90 mm, o máximo de atenuação diminui (-9,5 dB) e desloca-se para 10,3 GHz. Já, com 80% em massa de ferrita no MARE, o valor de atenuação da onda eletromagnética incidente melhorou (-25,3 dB) (Figura 3(b)), quando comparada com a amostra de espessura de 3,05 mm, que mostra o valor de refletividade de -16,1 dB (Figura 4(a)).

A análise da Figura 4(a) mostra mais claramente para a amostra com 70% em massa de ferrita (curva em azul), o formato de “V”, sugerindo comportamento de atenuação por cancelamento de fases da onda. Esse mecanismo de atenuação é baseado na obtenção de uma espessura elétrica do MARE, ou seja, a onda eletromagnética refletida na parte frontal se cancela com a onda emergente do material, por estarem em fases invertidas de 0° e 180° (Pereira, 2007). Tem-se, ainda, o deslocamento da região de ressonância para mais baixas frequências, com o aumento da concentração de hexaferrita no material e a variação da espessura (Figura 4(b)). Estes resultados obtidos sugerem a aplicação dos materiais obtidos em frequências abaixo de 8 GHz.

CONCLUSÕES

A caracterização eletromagnética das amostras de MARE preparadas com a variação da concentração de ferrita de $[\text{Ca}(\text{CoTi})_{0,2}\text{Fe}_{11,6}\text{O}_{19,96,0}][\text{La}_2\text{O}_3]_{4,0}$, de 40 a 80%, em massa, mostra valores de atenuação de -5,0 a -25,3 dB, que correspondem de 70 a 99,5% de atenuação da onda incidente. Este comportamento observado é concordante com o aumento mais acentuado do componente ϵ_r' , que variou de, aproximadamente, 4 - 10 para as amostras de MARE. Estes resultados são atribuídos ao amolecimento do comportamento magnético da hexaferrita de cálcio, que após a incorporação dos íons CoTi e La deslocou, provavelmente, a sua frequência de ressonância para frequências mais baixas, viabilizando a sua utilização como centro absorvedor de micro-ondas na banda X (8,2 a 12,4 GHz).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa Sontag/SP, na pessoa do Sr. Mário Dutra (*in memoriam*) pela preparação da amostra de ferrita, ao Departamento de Física Teórica e Experimental da UFRN pelas medidas de MAV, à FINEP (Processo 1757/04), ao CNPq (Processo 301583/06-3) e ao Comando da Aeronáutica pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

- Agilent technologies, 2005, “Materials measurement software Agilent 85071E”, Palo Alto, CA: 2005b. 8 p. Agilent Technical Overview.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2008, “ASTM D5568-08: Standard Test Method for Measuring Relative Complex Permittivity and Relative Magnetic Permeability of Solid Materials at Microwave Frequencies Using Waveguide” .
- Bueno, A. C. , 2003, “Síntese e caracterização da ferrita de NiZn dopada com íons metálicos para aplicações em absorvedores de radiações eletromagnéticas”, Ph.D. Thesis , Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, R.J., Brazil, 164p.
- Cabral, A.J.O., 2005. “Síntese de Hexaferrita de Bário Dopada com Cobalto-Titânio por Moagem Quimicamente Assistida Seguida de Calcinação”, Ph.D. Thesis, Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, R.J., Brazil.
- Dias, J.C., 2000, “Obtenção de Revestimentos Absorvedores de Radiação Eletromagnética (2-18 GHz) Aplicados no Setor Aeronáutico”, Ph.D. Thesis, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, S.P., Brazil.
- Dishovski, N., Petkov, A., Nedkov, I. V., Razkazov, I.V., 1994, “Hexaferrite Contribution to Microwave Absorbers Characteristics”, IEEE Transactions on Magnetics. Vol. 30, Nº. 2, pp. 969-971.
- Feng, Q.; Jen, L., 2002, “Microwave Properties of ZnTi-substituted M-type Barium Hexaferrites”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 38, Nº. 2, pp. 1391-1394.
- Folgueras, L.C., 2005, “Obtenção E Caracterização de Materiais Absorvedores de Microondas Flexíveis Impregnados com Polianilina”, Ph.D. Thesis, Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, S.P., Brazil.
- Gupta, S. C., Agrawal, N. K., C., Kumar, M.V., 1992, “Design of a Single Layer Broadband Microwave Absorber Using Cobalt-Substituted Barium Hexagonal Ferrite”, IEEE Microwave Theory and Techniques Society, pp. 317-320.
- Haijun, Z., Zhichao, L., Chengliang, M.A., XI, Y.; Liangying, Z.; Mingzhong, W., 2002, “Complex Permittivity, Permeability, and Microwave Absorption of Zn- and Ti-Substituted Barium Ferrite by Citrate Sol-Gel Process”, Materials Science and Engineering, Vol. B96, pp. 289-295.
- Hallynck, S., 2005, “Elaboration et Caractérisations de Composites Chargés en Ferrite Spinel à Morphologie Contrôlée Pour Utilisations Micro-Ondes”, Ph.D. Thesis, Docteur de L’Université Strasbourg I – Louis Pasteur Spécialité, Physique-Chimie des Matériaux, France.
- Horvath, M.P., 2000, “Microwave Applications of Soft Ferrites”, Journal of Magnetism and Materials, Vol. 215-216, pp. 171-183.
- Lax, B., Button, K.J., 1962, “Microwave Ferrite and Ferrimagnetics”. New York, McGraw-Hill Book Company, pp. 47, 92-95, 114-124.
- Lee, S. M., 1991, “International Encyclopedia of Composites”. VCH Publishers, Vol.6.
- Lima, R.C., 2007, “Propriedades absorvedoras de microondas de compostos epoxídicos de Y-hexaferritas de bário obtidas pelo método de combustão do gel de citrato”, Ph.D. Thesis , Engenharia Metalúrgica e de Materiais , COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, R.J., Brazil, 180p.
- Lima, R.C., Leandro, J. C. S., Ogasawara, T., 2003. “Síntese e Caracterização da Hexaferrita de Bário Tipo m Dopada com Lantânio e Sódio para Utilização Como Absorvedor de Microondas”, Revista Cerâmica, Vol. 49, pp. 44-47.
- Meshram, M. R., Agrawal, N. K., Sinha, B., Misra, P.S., 2003. “Characterization of (Co-Mn-Ti) Substituted M Type Barium Hexagonal Ferrite Based Microwave Absorber at X Band”, Antennas, Propagation and EM Theory, Vol. 28, pp. 746 -749.
- Michalikovh, M., Gruskovh, A., Vicen, R., Lipka, J., Sláma, J., 1994, “Co, Ti, Mn-Precipitated Barium Hexaferrite Powders”, IEEE Transactions on Magnetics. Vol. 30, No. 2, pp. 654-656.
- Narang, S. B., Hudiana, I.S., 2006, Microwave dielectric properties of M-Type barium, calcium and strontium hexaferrite substituted with Co and Ti, Journal of Ceramic Processing Research, Vol. 7, Nº. 2, pp. 113-116.
- Nedlov, I., Milenova, L., Dishivsky, N., 1994, “Microwave Polymer-Ferroxide Film Absorbers”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 30, Nº. 6, pp. 4545-4547.
- Nohara, E.L., 2003, “Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética (8-12 GHz) Obtidos pela Combinação de Compósitos Avançados Dielétricos e Revestimentos Magnéticos”, Ph.D. Thesis, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, S.P., Brazil.

- Paulo, E.G., Pinho, M. S., Lima, C. R., Gregori, M. L., Ogasawara, T., 2004, “Compósitos de Ferrita de Ni-Zn com Policloropreno para Utilização como Materiais Absorvedores de Radar Para a Banda S”, *Cerâmica*, Vol. 50, Nº. 314, pp. 161-165.
- Paulo, E. G., 2006, “Síntese e caracterização de ferrita de níquel e zinco nanocristalina por combustão, para aplicação em compósito elastomérico absorvedor de microondas. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, R.J.
- Pereira, J. J., 2007, “Caracterização Eletromagnética de Materiais Absorvedores de Microondas Via Medidas de Permissividade e Permeabilidade Complexas na Banda X”, Universidade de Taubaté, Taubaté, S.P., Brazil.
- Petrov, V. M., Gagulin, V.V., 2001, “Microwave Absorbing Materials”, *Inorganic Materials*, Vol. 37, Nº. 2, pp. 93-98.
- Pinho, M.S., Lima, R.C., Soares, B.G., Nunes, R. C. R., 1999. “Avaliação do Desempenho de Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética por Guia de Ondas”, *Polímeros*, Vol. 9, Nº. 4, pp. 23-26.
- Qiu, J., Zhang, Q., Mu, G., 2005, “Effect of Aluminum Substitution on Microwave Absorption Properties of Barium Hexaferrite”, *Journal of Applied Physics*, Vol. 98, pp. 103905-1-103905-5.
- Rewatkar, K.G., Patil, N. M., Gawali, S. R., 2005, “Synthesis and Magnetic Study of Co–Al Substituted Calcium Hexaferrite”, *Bulletin of Materials Science*, Vol. 28, Nº. 6, pp. 585–587.
- Ribeiro, U.L., 2006, “Síntese e Caracterização de Nanoferritas a Base de Níquel-Zinco e Níquel-Cobre-Zinco”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brazil.
- Singh, P., Babbar, V. K., Razdan, A., Srivastana, S. L., Puri, R. K., 1999, “Complex Permeability and Permittivity, and Microwave Absorption Studies of Ca(CoTi)_xFe_{12-2x}O₁₉ Hexaferrite Composites in X-Band Microwave Frequencies”, *Materials Science and Engineering*, Vol. B67, pp. 132-138.
- Sláma, J., Grusková, A., Papánová, M., Kevická, D., Jancárik, V., Dosoudil, R., Mendoza-Suárez, G., González-Angeles, A., 2005, “Properties of M–Type Barium Ferrite doped by Selected Ions”, *Journal of Electrical Engineering*, Vol. 56, Nº. 1-2, pp. 21–25.
- Von Aulock, W.H., 1965, “Handbook of Microwave Ferrite Materials”, Academic Press, New York, pp. 1-3, 15, 351, 452, 471.
- Yusoff, A. N., Abdullah, M. H., 2004, “Microwave Electromagnetic and Absorption Properties of Some LiZn Ferrites”, *Journal of Magnetism and Materials*, Vol. 269, pp. 171-180.
- Zhou, X. Z., Morrish, A. H., Yang, Z., Zeng, H., 1994, “Co-Sn Substituted Barium Ferrite Particles”, *Journal Applied Physics*, Vol. 75, Nº. 10, pp. 5556-5558.