

Ferritas Ni-Zn para uso em materiais absorvedores de radiação eletromagnética: influência do tratamento térmico

A. C. F. M. Costa^{1*}, V. J. Silva¹, A. P. Diniz¹, R. H. G. A. Kiminami², D. R. Cornejo³, A. M. Gama⁵, M. C. Rezende⁴, L. Gama¹

¹Universidade Federal de Campina Grande, Departamento de Engenharia de Materiais, Av. Aprígio Veloso - 882, Bodocongó, 58109 - 970, Campina Grande - PB, Brasil

²Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia de Materiais, 13565 - 905, São Carlos - SP, Brasil

³Universidade de São Paulo, Instituto de Física, 05508 - 900, São Paulo - SP, Brasil

⁴Centro Técnico Aeroespacial, Divisão de Materiais, 12228 - 904 - São José dos Campos - SP, Brasil

⁵Instituto Tecnológico de Aeronáutica - Pça. Mal-do-Ar Eduardo Gomes, 50, 12228-900 - São José dos Campos - SP, Brasil.

*anacristina@dema.ufcg.edu.br

Resumo – Neste trabalho pós de ferrita $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ foram preparados por reação de combustão e submetidos ao tratamento térmico em temperaturas de 800, 1000 e 1200°C/2h. A influência do tratamento térmico sobre a estrutura, morfologia e propriedades eletromagnéticas de pós de ferrita Ni-Zn foram avaliadas. Os pós resultantes foram caracterizados por DRX, MEV, medidas magnéticas e medidas de refletividade na faixa de frequência de 8,0 – 12,0 GHz. Os resultados demonstraram que a elevação da temperatura de tratamento térmico causou um aumento no tamanho de partícula dos pós favorecendo então, a obtenção de materiais com melhor refletividade.

Palavras-chaves — Ferrita Ni-Zn, tratamento térmico, absorvedor de radiação eletromagnética.

I. INTRODUÇÃO

As aplicações relacionadas a Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética (MARE), tradução brasileira para o termo Radar Absorbing Material (RAM), vão desde o revestimento externo de aviões militares, para torná-los imperceptíveis aos radares, até a blindagem interna de aeronaves civis, no isolamento dos cabos elétricos e na vedação das cabines de comando, evitando interferências na instrumentação das aeronaves como as provocadas por aparelhos celulares. Estes materiais também podem ser utilizados em sistemas de comunicação para eliminar ondas eletromagnéticas indesejáveis, no revestimento interno de fornos de microondas, com o objetivo de impedir o vazamento de radiação e na blindagem magnética de marcapassos [1]. A absorção de energia eletromagnética em materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE) está ligada ao fenômeno de ressonância, relacionado com o mecanismo de interação onda/matéria [2].

No caso de materiais ferrimagnéticos, o mecanismo de absorção de ondas eletromagnéticas é bastante complexo. As ferritas cerâmicas são materiais que podem absorver a radiação eletromagnética na faixa de microondas para aplicações aeronáuticas principalmente na faixa de frequências de 8 a 12 GHz, pois geram uma perda de energia, que neste caso, atua de forma construtiva [3]. O efeito físico fundamental necessário para uma ferrita de microondas é a ressonância giromagnética, a qual ocorre quando o material é submetido a um campo eletromagnético desejado. As ferritas

de estrutura cristalina cúbica do tipo espinélio devido à sua alta resistividade elétrica e à sua aplicação em altas frequências, compreendidas entre 100MHz e 500GHz [4], estão situadas na classe das ferritas moles (magnetos não permanentes, que se magnetizam e desmagnetizam, com grande facilidade). Estes materiais apresentam excelente combinação entre as propriedades magnéticas e dielétricas reunidas em um mesmo material, sendo que suas propriedades podem ser ajustadas pela adição de íons metálicos divalentes e/ou trivalentes [5] ou por modificação no processamento [6]. As ferritas, de uma maneira geral, são absorvedores de radiação eletromagnética por natureza e apresentam a versatilidade de poderem ser manufaturadas com geometrias diferentes, ou utilizadas na forma de ferritas policristalinas (corpo sinterizado), ou de compósitos de ferrita (adição da ferrita em pó em uma matriz apropriada), tais como em tintas [7].

O processamento de partículas de materiais ferrimagnéticos, especificamente ferritas Ni-Zn, em escala industrial é feito pelo método convencional de mistura de óxidos, que apesar de ser um método relativamente econômico, não permite o controle da homogeneidade e pureza, principalmente por utilizar processos de mistura e moagem. Em escala de laboratório, vários métodos químicos vêm sendo desenvolvidos para síntese de ferritas, dentre eles podem-se citar sol-gel [8], citrato precursor [9], síntese por reação de combustão [10] etc. O processo de síntese por reação de combustão tem sido empregado com sucesso para a obtenção de diversos tipos de materiais, visto que possibilitam a obtenção de pós com partículas nanométricas, elevada área superficial e um alto grau de pureza. Com relação a outros métodos de síntese, o processo de reação por combustão torna-se vantajoso devido à sua simplicidade, pequeno tempo de duração entre a preparação de reagentes, produto final não necessitar de etapas intermediárias de tratamento térmico subseqüentes, e baixos consumos de energia envolvida durante a síntese. Além do mais, o método não-convencional de reação por combustão sintetiza pós com alta pureza, homogeneidade química, e normalmente gera produtos com estruturas e composição desejadas, devido à elevada homogeneidade favorecida pela solubilidade dos sais em água [11]. O processamento de materiais absorvedores magnéticos é feito pela incorporação de partículas magnéticas

em uma base polimérica, do tipo poliisopropeno, neopreno, nitrilas, silicone, uretano, epóxi, dentre outras [12].

Com base neste contexto, o presente trabalho objetiva avaliar o efeito do tratamento térmico em temperaturas de 800, 1000 e 1200°C sobre a estrutura, morfologia e propriedades eletromagnéticas dos pós de ferritas Ni-Zn obtidas por reação de combustão visando sua aplicação como material absorvedor de radiação de energia eletromagnética.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

A síntese por reação de combustão para preparação das ferritas $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ envolveu uma mistura contendo íons metálicos, como reagentes oxidantes (nitratos), e um combustível (uréia), como agente redutor. Para esta mistura redox foram utilizados nitrato de níquel - $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Merck), nitrato de zinco - $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Merck), nitrato de ferro - $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (Merck) e uréia - $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ (Synth). Para a obtenção dos pós uma solução redox de nitratos metálicos e uréia, preparadas de acordo com a composição estequiométrica estabelecida de acordo com os conceitos da química dos propelentes [13], foi misturada em um becker tipo Pirex e submetida ao aquecimento direto em placa quente, a temperatura aproximada de 480°C, até a ocorrência da auto-ignição (combustão). A síntese detalhada dos pós de ferrita Ni-Zn por reação de combustão encontra-se em Costa [14]. Após a síntese os pós foram submetidos ao tratamento térmico nas temperaturas de 800, 1000 e 1200°C por 2h.

Os pós resultantes foram caracterizados por difratometria de raios X utilizando um difratômetro de raios X SHIMADZU modelo XRD 6000, radiação Cu K que opera com tubo de alvo de cobre a uma voltagem de 40 kV e 40 mA de corrente. Os dados de difração de raios X foram usados para identificação das fases e cálculo do tamanho médio de cristalito (a partir da linha de alargamento de raios X (d_{311}) através da deconvolução da linha de difração secundária do silício policristalino, (utilizado como padrão) utilizando-se a equação de Scherrer [15]; microscopia eletrônica de varredura (MEV) (Microscópio Philips, Modelo XL30 FEG) para avaliação morfologia dos aglomerados de partículas. Os ciclos de histerese magnética dos pós foram obtidos utilizando um Magnetômetro de Gradiente Alternado (AGM), operando em campo aplicado de -20000 até +20000. As perdas por histerese foram estimadas pela área da curva $\sigma-H$.

As amostras utilizadas na caracterização eletromagnética foram preparadas por meio da mistura do pó à base das ferritas Ni-Zn-Sm em uma matriz polimérica de resina epóxi, na proporção de 1:1, ou seja, 50% em massa, com espessura de 2 mm. Para confecção dos corpos de prova foi utilizada uma placa plana de alumínio como base para fixar os moldes. Tais moldes foram mergulhados em uma solução de desmoldante e posteriormente colocados sobre a placa de alumínio. A parafina foi utilizada para fixar o molde na placa evitando-se, assim, o vazamento do material utilizado na preparação dos corpos-de-prova. A mistura (resina + endurecedor + pó de ferrita) foi homogeneizada e posteriormente vazada dentro do molde. Após a adição da mistura inicial dentro dos moldes, uma fita de silicone foi fixada ao redor da placa de alumínio com a finalidade de montar a bolsa de vácuo, a qual foi utilizada para auxiliar na preparação dos corpos-deprova visando facilitar a retirada de

bolhas de ar de dentro do material. O tempo de cura foi de aproximadamente 24 horas. Passado esse tempo, o material foi retirado do molde e, posteriormente, foi feita a preparação para a medida da refletividade. Os corpos-de-prova após terem sido retirados do molde passaram por tratamento metalográfico, cuja finalidade foi retirar as rebarbas e ajustar as dimensões e em seguida foram submetidos à caracterização eletromagnética.

A análise e caracterização da absorção de radiação eletromagnética foram executadas em câmara para teste de material absorvedor de radiação. As amostras utilizadas na caracterização eletromagnética foram preparadas por meio da mistura do pó de ferrita em uma matriz polimérica de resina epóxi, na proporção de 1:1, ou seja, 50% em massa, com espessura de 2 mm. O tempo de cura foi de aproximadamente 24 horas. O método de caracterização eletromagnética adotado baseia-se na técnica de medidas de refletividade em guia de ondas, no qual o material a ser caracterizado é posicionado em uma cavidade de guia de ondas, utilizando um acoplador direcional na faixa de frequências entre 8 – 12GHz, marca Hewlett-Packard, modelo X752C, ligado a um analisador de espectro série 70000 (Hewlett-Packard) e a um gerador de sinais sintetizado 83752A (Agilent), cabos coaxiais de baixas perdas da empresa Adam Russel e Suhner, adaptadores coaxiais de baixas perdas da empresa Suhner, e um microcomputador PC, com interface GPIB (General Purpose Interface Bus).

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Fig. 1 apresenta os difratogramas de raios X dos pós de ferrita Ni-Zn, com composição nominal $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$, sem calcinar e após serem submetidos ao tratamento térmico nas temperaturas de 800, 1000 e 1200°C.

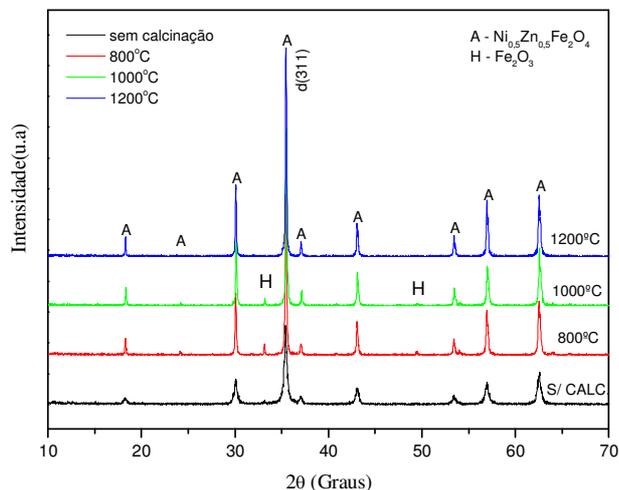


Fig. 1. Difratogramas de raios X dos pós de ferrita $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ antes e após tratamento térmico.

Podemos observa-se que os pós antes e após o tratamento térmico a 800 e 1000°C apresentaram a formação da fase cristalina majoritária da ferrita Ni-Zn (ficha JCPDF 08-0234) com presecça de traços de hematita (ficha JCPDF 89-8104), como fase secundária. Entretanto, para os pós sinterizados a temperatura de 1200°C, verificou-se unicamente a formação da fase majoritária ferrita Ni-Zn. Observamos também que a hematita livre presente nos pós começou a reagir (via sinterização reativa) a partir de 1000°C, permitindo, assim, a completa formação da fase ferrita Ni-Zn na temperatura de

1200°C. Além disso, pode-se observarmos, de uma forma geral, um considerável alargamento na linha de difração desses pós, indicando, assim, a natureza nanométrica das partículas dos pós de ferrita Ni-Zn e que o alargamento diminui com o aumento da temperatura de tratamento térmico. O tamanho de cristalito dos pós de ferrita $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ antes e após tratamento térmico de 800, 1000 e 1200°C foi de 11, 55, 61 e 76 nm, respectivamente. Podemos observar que a elevação da temperatura provocou uma redução considerável no tamanho de cristalito dos pós do sistema avaliado.

A Fig. 2 exibem as micrografias mostrando a morfologia dos pós de ferrita $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ antes e após o tratamento térmico. Foi possível verificarmos que as partículas são muito pequenas (menor que 100 nm). Isto gera alta tensão superficial, fornecendo assim força motriz para a aglomeração das mesmas, levando, então a formação de aglomerados moles de partículas nanométricas. Observa-se, claramente, a partir da Fig. 2b até 2d que a elevação da temperatura de tratamento térmico ocasionou o aumento das partículas dos pós do sistema em estudo. A 800°C (Fig. 2b) observa-se ainda uma morfologia de partículas finas aglomeradas com características moles (fácil desaglomeração, constituída por forças de Van der Waals). Porém, a 1000°C e 1200°C observamos a formação de partículas grandes e densas (agregadas) maiores que 1 µm.

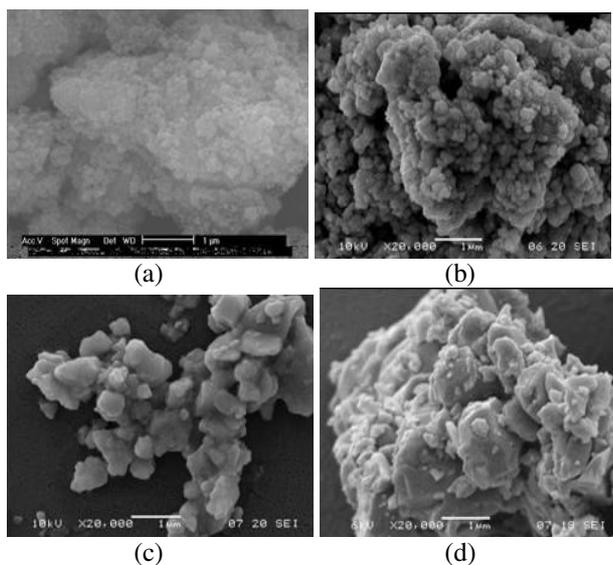
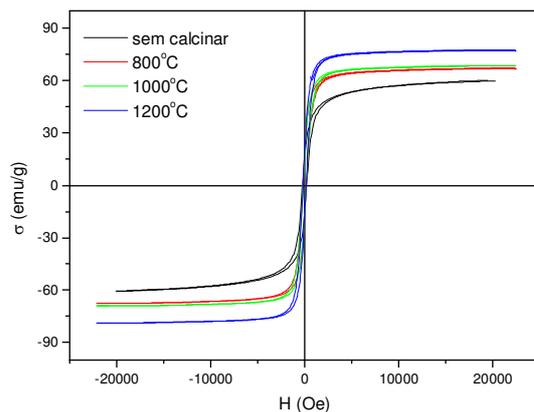
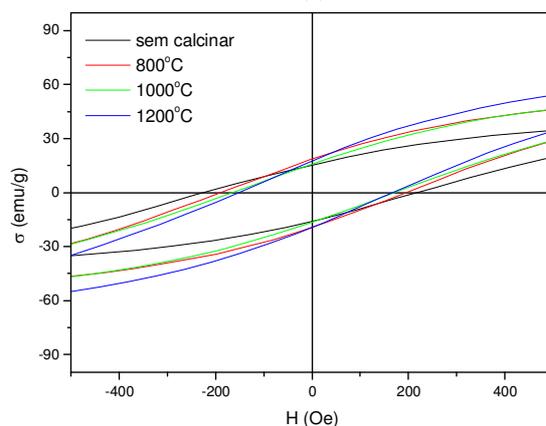


Fig. 2. Micrografias obtidas por MEV mostrando a morfologia das partículas dos pós de ferrita $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$: (a) Sem calcinar, (b) 800°C/2h, (c) 1000°C/2h e (d) 1200°C/2h.

A Fig. 3 exibe a dependência da magnetização (σ) em função do campo magnético aplicado (H) por meio do laço de histerese para os pós correspondentes ao sistema $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$, antes e após tratamento térmico a 800, 1000, 1200°C por 2h com taxa de aquecimento de 5°C/min. Podemos verificar que os pós obtidos por reação de combustão antes e após o tratamento térmico apresentaram ciclo $\sigma \times H$ estreito, sendo, portanto, característica de um material magnético mole (fácil magnetização e desmagnetização). Além disso, pode-se verificar que a elevação da temperatura de tratamento térmico influenciou de forma a aumentar a área da curva de histerese e um aumento da magnetização de saturação (σ_s).



(a)



(b)

Fig. 3. (a) Curvas de histerese σ - H dos pós de ferrita $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ e (b) ampliações das histerese para medição da campo coercivo (H_c).

A área do laço de histerese é um indicativo do aumento das perdas por histerese, devido à elevação de dissipação de energia. Para as amostras antes e após tratamento térmico a 800, 1000 e 1200 °C por 2h os valores de campo coercitivo e magnetização de saturação variaram entre 217,4-161 Oe; e 60,3-77,8 emu/g, respectivamente. Comparando os pós sem calcinar com o pó calcinado a 1200°C/2h nota-se uma redução no campo coercivo de 26 % e um aumento na magnetização de saturação de 22,5 %.

A Tabela I apresenta os valores dos parâmetros magnéticos obtidos a partir das curvas de histerese apresentadas na Fig. 3 para os pós de ferrita Ni-Zn antes e após tratamento térmico nas temperaturas de 800, 1000 e 1200°C.

TABELA I. PARÂMETROS DE HISTERESE DOS PÓS CORRESPONDENTES AO SISTEMA A $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$.

Sistemas	H_c (Oe)	σ_r (emu/g)	σ_s (emu/g)	σ_r/σ_s
A1	217,4	14,9	60,3	0,25
A2	214,5	17,7	67,3	0,26
A3	187,7	14,9	68,7	0,22
A4	160,9	16,3	77,8	0,21

Caizer e Stefanescu [16] estudaram o efeito do tamanho de cristalito sobre a magnetização de saturação e o campo

coercitivo de ferritas Ni-Zn com composição $Ni_{0,35}Zn_{0,65}Fe_2O_4$, obtidas após tratamento térmico nas temperaturas de 500, 700 e 900°C de uma mistura de óxidos quase-amorfa resultante de uma decomposição térmica a temperatura aproximada de 350°C da combinação complexa $Fe_2^{3+}(Zn_x^{2+}, Ni_{1-x}^{2+})(OH)_4(C_2H_2O_4^{2-})_2 \cdot nH_2O$ ($n = 1$; $x = 0,65$). Os pesquisadores observaram que o aumento da temperatura de tratamento térmico favoreceu a obtenção de partículas com maior tamanho de cristalito. Além disso, foi verificado o aumento da magnetização de saturação e a diminuição do campo coercitivo em função do aumento do tamanho de cristalito, decorrente do aumento da temperatura de tratamento térmico. Os valores de tamanho de cristalito obtidos por Caizer variam de 20,3-37,9 nm. O máximo valor de coercitividade detectado por esses pesquisadores foi para o tamanho médio de cristalito de 29 nm. O aumento da magnetização de saturação resultante do aumento do tamanho de cristalito das partículas também foi observado por outros autores [17]. Tais resultados estão coerentes com os valores aqui relatados.

A Fig. 4 mostra as curvas de refletividade em função da frequência para a ferrita de níquel-zinco. O que difere uma ferrita da outra é a temperatura em que foi submetida durante o tratamento térmico: (a) sem calcinar, (b) calcinada a temperatura de 800°C, (c) calcinada a temperatura de 1000°C, (d) calcinada a temperatura de 1200°C.

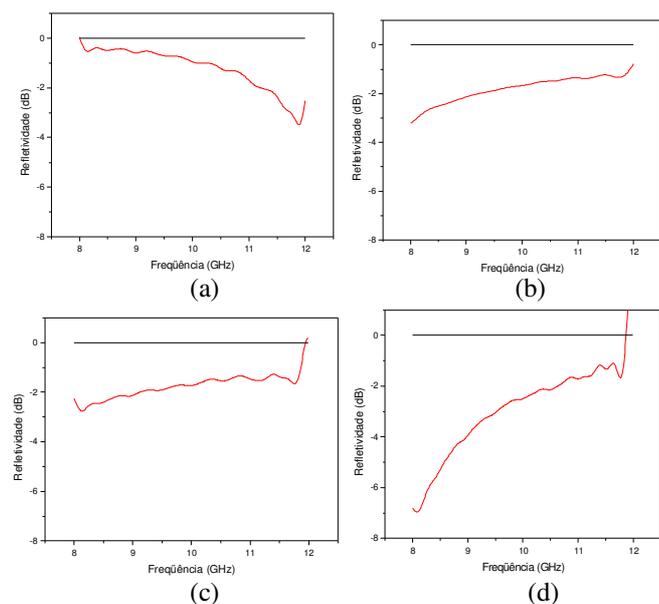


Fig. 4. Refletividade versus frequência referente ao sistema $Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe_2O_4$: (a) A1 - Sem calcinar; (b) A2; (c) A3; (d) A4.

As curvas mostram a influência das diferentes temperaturas de tratamento térmico nos valores de medidas de refletividade. Para o pó de ferrita sem calcinar (Fig. 4a) observa-se um valor máximo de refletividade próximo a -4 dB para uma frequência de aproximadamente 12,0 GHz com um tamanho de cristalito de 11 nm. À medida que a temperatura se eleva o tamanho de cristalito aumenta consideravelmente e isto interfere no comportamento da refletividade, ou seja, a 800 e 1000°C/2h (Fig. 4b e 4c) a refletividade torna-se praticamente constante em aproximadamente -3 dB na faixa de frequência de 8,0 a 12,0 GHz.

Por outro lado, a 1200°C/2h (Fig. d) observa-se um comportamento oposto, a máxima refletividade (≈ -7 dB) ocorre na frequência menor de 8,0 GHz e para 12,0 GHz observa-se uma queda na refletividade para -3 dB. Vale ressaltar que na temperatura de 1200°C a ferrita é monofásica e o tamanho de cristalito é praticamente 7 vezes superior ao tamanho de cristalito do pó sem calcinar. Desta forma, tanto a ferrita sem calcinar como a calcinada a 1200°C apresenta um comportamento de absorvedor de radiação eletromagnética de banda estreita, ou seja, a ressonância magnética ocorre numa determinada frequência. Enquanto que a ferrita calcinada a 800°C e 1000°C embora apresentem um valor de refletividade menor, em torno de -3 dB, mostram um comportamento de absorvedor de radiação eletromagnética para banda larga, ou seja, o valor de refletividade permanece praticamente inalterado ao longo da faixa de frequência de 8 - 12,0 GHz.

Paulo et al. [18] obtiveram Materiais Absorvedores de Microondas (MARE) para ser utilizados na faixa de frequência de 2,6 a 4,0 GHz (banda S). Estes pesquisadores utilizaram ferrita de Ni-Zn com composição $Ni_{0,35}Zn_{0,64}Mn_{0,04}Fe_{2,00}O_{4,00}$ obtida pelo processo de mistura/moagem, que foram misturadas com polipropileno, com adição de agentes de vulcanização, resultando em compósitos com composição percentual em peso 80:20 da ferrita Ni-Zn:CR (% em peso). Os resultados obtidos demonstraram que o compósito 80:20 de Ni:Zn:CR com espessura de 6 mm apresentou melhor desempenho como MARE com absorção superior a 96,9% (-15 dB), para a faixa de 2,6 a 4,0 GHz (banda S), além de oferecer boa resistência salina, o que os torna adequados para uso como um eficiente MARE em partes estratégicas de plataformas militares.

Lima et al. [19] obtiveram hexaferritas de Bário dopada com lantânio e sódio, com composição $Ba_{0,8}La_{0,1}Na_{0,1}Fe_{12}O_{19}$, pelo processo de mistura de óxidos, visando aplicação como absorvedor de microondas. Segundo este pesquisador, não foi verificado pico de absorção no intervalo de frequência de 8,0 - 16,0 GHz. Entretanto, a substituição de íons de Ba^{2+} por íons Na^{1+} acarretou a redução do campo coercitivo, que por sua vez reduziu o valor da frequência de ressonância, permitindo que a hexaferrita de bário passasse a absorver neste intervalo de frequência (8,0 - 16,0 GHz). Diferente dos resultados obtidos por Lima et al., no presente trabalho, a redução do campo coercitivo de 217,4 Oe para 160,9 Oe, em função do aumento da temperatura de calcinação, resultou na elevação da frequência de ressonância de -4 dB para -7 dB, tornando-o adequado para uso como absorvedor de radiação eletromagnética de banda estreita.

Comparando os resultados de absorção reportados neste trabalho com o resultados de Lima et al. [19] sobre hexaferritas $Ba_{0,8}La_{0,1}Na_{0,1}Fe_{12}O_{19}$ obtidas pelo processo de mistura de óxidos, podemos observar um comportamento semelhante na ressonância com relação ao aumento do tamanho de cristalito em função do aumento da temperatura de tratamento térmico, resultando na elevação da frequência de ressonância de -4 dB para -7 dB, o que torna este material adequado para uso como absorvedor de radiação eletromagnética de banda estreita.

IV. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no decorrer deste trabalho demonstraram que: os pós sem e com tratamento térmico de 800 e 1000°C/2h apresentaram a formação da fase majoritária ferrita Ni-Zn e traços da segunda fase hematita. A 1200°C/2h observou-se apenas a fase ferrita Ni-Zn com alta cristalinidade. A elevação da temperatura de tratamento térmico aumentou o tamanho de cristalito de 11 para 76 nm. A micrografia do pó sem calcinar mostra partículas muito pequenas (menor que 100 nm) aglomeradas. A elevação da temperatura ocasionou o aumento das partículas sendo observado a 1000°C e 1200°C partículas grandes e densas (agregadas) de tamanho superior a 1 µm. A elevação da temperatura de tratamento térmico favoreceu o aumento do tamanho de partículas, o que contribuiu de forma a melhorar as propriedades eletromagnéticas. A amostra A4, calcinada a 1200°C, apresentou os melhores valores de magnetização de saturação e campo coercitivo, com valores de 77,8 emu/g e 160,9 Oe., respectivamente. Para esta mesma temperatura de 1200°C/2h foi observado o melhor valor de refletividade (\approx -7dB) para frequência de 8,0 GHz. Os pós antes e após o tratamento térmico a 1200°C/2h mostraram-se adequados para o uso como absorvedores de banda estreita, enquanto que os pós calcinados a 800 e 1000°C/2h apresentam-se adequados para utilização como absorvedores de banda larga.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CTA, CNPq e FAPESP pelo financiamento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] Drible no radar, Revista Pesquisa Fapesp, vol. 93, p. 72, 2003.
- [2] L. Mikhailovski, et al. International Conference on Currentless Spin-Electronics, Firsanovka. Hexaferrites for radioabsorbing materials. Rússia: Moscow Power Engineering Institute, vol. 6, p. 3, 1997.
- [3] S. C. Gupta, N. L. Agrawa, Broad band thin sheet absorbers for S-, C-, X- and Ku-bands. J. IETE, vol. 39, pp. 197-200, 1993.
- [4] M. S. Pinho, M. L. Gregori, R. C. R. Nunes, B. G. Soares, Performance of radar absorbing materials by waveguide measurements for X and Ku-band frequencies, Eur. Polymer J, vol. 38, n. 11, pp. 2321-2327, 2002.
- [5] L. K. Sveum, and S. Mo, Cation order in Solution-Synthesized Ferrites. Ceramic Transactions, vol.47, pp. 305-310, 1995.
- [6] A. M. Sankpal, and S. S. Suryavanshi, Initial permeability studies on Al³⁺ and Cr³⁺ substituted NiZn ferrites. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, vol. 9, pp. 173-179, 1998.
- [7] Y. Li, R. Liu, Z. Zhang, C. Xiong, Synthesis and characterization of nanocrystalline BaFe_{9.6}Co_{0.8}Ti_{0.8}O₁₉ particles, Material Chemical Physical, vol. 64, pp. 256-259, 2000.
- ¹A. C. F. M. Costa, anacristina@dema.ufcg.edu.br, Tel +55-83-33101182, ramal 35, Fax +55-83-3310-1178; V. J. Silva, valmirjsilva33@yahoo.com.br, Tel 083-3333-2790, Fax +55-83-3310-1178; R. H. G. A. Kiminami, ruth@power.ufscar.br, Tel. +55-16-33518502, Fax +55-16-3361-5404, M. C. Rezende, mirabel@iea.cta.br, Tel. +55-12-39476420, Fax. +55-12-3947-6405. Este trabalho financiado pelo CNPq, através do Projeto Edital CNPq n° 019/2004 – Universal – Processo: 471171/2004-2.
- [8] Z. Yue, et al. Synthesis of nanocrystalline NiCuZn ferrite powders by sol-gel auto-combustion method. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 208, pp. 55-60, 2000.
- [9] A. Verma, Dielectric properties of NiZn ferrites prepared by the citrate precursor method. Materials Science and Engineering, vol. B60, pp. 156-162, 1999.
- [10] A. C. F. M. Costa, et al. Effect of heating conditions during combustion synthesis on the characteristics of Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe₂O₄ nanopowders. Journal of Materials Science, vol. 37, pp. 1-4, 2002.
- [11] R. H. G. A. Kiminami, et al. Microwave synthesis of alumina powders. Journal of the American Ceramic Society Bulletin, vol. 70, n. 3, pp. 63-67, 2000.
- [12] S. M. Lee, International Encyclopedia of Composites. New York: VCH Publishers, vol.3, 1991.
- [13] S.R. Jain, K.C. Adiga, V. Pai verneker, *Combust. Flame*, vol.40, pp. 71-79, 1981.
- [14] A. C. F. M. Costa, Síntese por reação de combustão, sinterização e caracterização de ferritas Ni-Zn. 2002-221 p. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.
- [15] H. Klung, L. Alexander, X-ray diffraction procedures. New York: Wiley, 1962.
- [16] C. Caizer e M. Stefanescu, Nanocrystallite size effect on σ_s and H_c in nanoparticle assemblies. *Physica B*, vol. 327, pp. 129-134, 2003.
- [17] A. S. Albuquerque, J. D. Ardisson, W. A. A. Macedo, *Journal of Magnetism and Magnetic Material*, vol. 192, pp. 277, 1999.
- [18] E. G. Paulo, et al. Compósitos de ferrita de Ni-Zn com policloropreno para utilização como materiais absorvedores de radar para a banda S. *Revista Cerâmica*, vol. 50, pp. 161-165, 2004.
- [19] R. C. Lima, J. C. S. Leandro, T. Ogasawara, Síntese e caracterização da hexaferrita de bário tipo m dopada com lantânio e sódio para utilização como absorvedor de microondas. *Revista Cerâmica*, vol. 49, n. 309, 2003.