

Avaliação das características morfológicas e magnéticas de pós de ferritas Ni-Zn dopadas com cromo

V. J. Silva, A. P. A. Diniz¹, P.T.A. Santos¹, D.A. Vieira¹, A. C. F. M. Costa^{1*}, D. R. Cornejo², L. Gama¹

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

²Universidade de São Paulo, Instituto de Física, 05508-900, São Paulo, SP, Brasil

(Recebido em 22/08/2006; revisado em 19/10/2006; aceito em 23/10/2006)

(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

Resumo:

Nos últimos anos, vários métodos de síntese vêm sendo desenvolvidos, em escala de laboratório, visando à obtenção de pós cristalinos, com pequeno tamanho de partícula e elevada área superficial. Neste trabalho ferritas de Ni-Zn dopadas com cromo foram preparadas por reação de combustão e o efeito do cromo sobre as características finais dos pós foi investigado. Os pós resultantes foram caracterizados por difração de raios-X, espectroscopia de infravermelho, microscopia eletrônica de varredura e medidas magnéticas por meio de um magnetômetro de amostra vibrante. Os resultados mostram que todas as composições resultaram em pós nanométricos de ferritas de Ni-Zn com formação direta da fase do espinélio inverso com tamanho de cristalito variando de 21 para 26 nm. A inclusão do cromo causou uma diminuição da área superficial e um aumento da magnetização de 40 emu/g para 41 emu/g.

Palavras-chave: Cromo; ferrita Ni-Zn; reação de combustão; nanopartículas.

Abstract:

In the last years, several synthesis methods have been developed, in laboratory scale, seeking to the obtaining of crystalline powders, with small particle size and high specific surface area. In this work ferrites of Ni-Zn doped with chromium were prepared by combustion reaction and the effect of the chromium on the characteristics ends of the powders was investigated. The resulting powders were characterized by X-ray diffraction, infrared, scanning electron microscopy and magnetic measurements by a magnetometer of vibrating sample. The results show that all the compositions resulted in nanosized powders of Ni-Zn ferrites with direct formation of the phase of the inverse spinel with crystalline size varying from 21 to 26 nm. The inclusion of the chromium caused a decrease of the specific surface area and an increase of the magnetization from 40 emu/g to 41 emu/g.

Keywords: Chromium; ferrite Ni-Zn; combustion reaction; nanoparticles.

* E-mail do autor: anacristina@dema.ufcg.edu.br (A. C. F. M. Costa)

1. Introdução

As ferritas Ni-Zn são materiais cerâmicos ferrimagnéticos, também conhecidos como materiais magnéticos moles ou macios (soft), que apresentam configuração cúbica do tipo espinélio inverso, pertencente ao grupo espacial $Fd\bar{3}m$, cuja composição química é formada por uma solução sólida dos óxidos de NiO, ZnO, e Fe_2O_3 . A célula unitária é representada pela fórmula $(Zn_xFe_{1-x}) [Ni_{1-x}Fe_{1+x}]O_4[1,2]$. Os íons oxigênio formam um sistema de empacotamento fechado cúbico de face centrada. Os íons de ferro trivalentes ($5\mu B$) na rede espinélio podem ocupar as duas posições de simetrias diferentes, os sítios tetraédricos com coordenação IV e os sítios octaédricos com coordenação VI. Se os íons de Fe^{3+} estiverem distribuídos igualmente em ambos os sítios, seus momentos magnéticos se cancelam e a magnetização total, deve ser resultante dos momentos magnéticos dos íons Ni^{2+} ($2\mu B$), os quais apresentam energia preferencial pelos sítios octaédricos da rede do espinélio. Neste caso, o momento magnético total da rede é resultante apenas da fase inversa. Por outro lado, os íons de Fe^{3+} podem não estar distribuídos igualmente nos sítios tetraédricos e octaédricos, e isso pode ocorrer pela adição de ferrita normal, como por exemplo, $ZnFe_2O_4$, o que aumenta o momento magnético molecular da rede. Neste caso, os íons de Zn^{2+} vão ocupar o sítio tetraédrico e forçar um número igual de íons Fe^{3+} a saírem do sítio tetraédrico para octaédrico. Assim, podemos concluir que o momento magnético das ferritas será resultante da presença das fases normal e inversa. Dessa forma, é possível produzir um grande número de ferritas Ni-Zn com magnetização intrínseca, pela substituição adequada dos íons metálicos [1].

As ferritas do tipo espinélio são as mais estudadas científica e tecnologicamente, devido às suas aplicações na indústria eletroeletrônica como dispositivo magnético de alta resistividade. Esses materiais destacam-se não apenas pelos altos valores de resistividade e permeabilidade magnética inicial que apresentam, como também, pelos baixos valores de perdas por histerese e correntes parasitas, altas densidades de fluxo de saturação, baixa coercividade e boa absorção de radiação eletromagnética. As ferritas são comumente utilizadas em núcleos de transformadores e indutores de alta frequência de equipamentos eletrônicos, dispositivos de microondas empregados em telecomunicações e em radar (como isoladores, circuladores e absorvedores de radiação na faixa de microondas), barras para antenas, cabeças

de leitura e gravação magnética de alta velocidade, etc. [3-5].

As propriedades magnéticas extrínsecas das ferritas, tais como a permeabilidade, coercividade, perdas por histerese e corrente parasita, dependem fortemente de sua microestrutura, ou seja, do contorno de grão, do seu tamanho médio e de sua porosidade. A microestrutura pode ser controlada pela variação no processamento, isto é, preparação do pó, calcinação, moagem e condições de sinterização (temperatura, tempo e atmosfera) e por introdução de dopantes [6].

Com intuito de melhorar as propriedades magnéticas destes materiais vários dopantes vem sendo testados em suas composições utilizando diferentes métodos químicos. Portanto, a seguir será relatado o uso de alguns dopantes e métodos químicos.

Costa e colaboradores [7] estudaram a utilização do Sm^{3+} na ferrita Ni-Zn preparadas via reação de combustão. Os autores observaram que a elevação da concentração de Sm^{3+} aumentou o campo coercivo e as perdas por histerese, e diminuiu a magnetização e a permeabilidade das amostras. Observaram ainda que a adição de Sm^{3+} no sistema $Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe_2O_4$ inibiu o crescimento de grão e aumentou a densidade final das amostras, resultando em ferritas Ni-Zn-Sm com densidade relativa em torno de 100% da densidade teórica.

A adição de Bi_2O_3 nas ferritas Mn-Zn preparadas pelo método de mistura de óxidos foi utilizado por Drofenik e colaboradores[8] para promover o crescimento de grão e aumentar a permeabilidade magnética durante a sinterização. Os resultados mostraram que pequenas adições de $Bi_2O_3 < 0,05\%$ em peso aumentaram consideravelmente a permeabilidade. Por outro lado, a adição de $0,05\%$ em peso de Bi_2O_3 induziu a formação de uma microestrutura composta de grãos gigantes com poros aprisionados dentro de uma microestrutura normal. A permeabilidade das amostras mostrou uma pronunciada permeabilidade máxima secundária. Para altas concentrações de Bi_2O_3 , acima de $0,2\%$ em peso, o crescimento de grão foi retardado e uma microestrutura normal foi observada. Porém, a permeabilidade magnética foi fortemente reduzida.

O efeito da adição de Cr nas ferritas de lítio, obtidas via combustão auto-propagante SHS (Self-propagating), foi investigado por Kuznetsov e colaboradores[9,10]. Em seus estudos, observaram que o aumento do teor de cromo causou uma redução do parâmetro de rede, visto que o Cr possui menor raio iônico que o Fe. A força coerciva aumentou ao

máximo e a magnetização remanente diminuiu ao máximo com o aumento do teor de Cr. Estes resultados foram atribuídos ao crescimento de clusters superparamagnéticos nas ferritas com o aumento do teor de Cr.

Jain e colaboradores[11] avaliaram a influência da adição de V_2O_5 na condutividade elétrica e propriedades magnéticas de ferritas Ni-Zn preparadas pelo método de mistura de óxidos. Os pesquisadores observaram que o teor de 0,4% em mol de V_2O_5 , para todas as temperaturas de sinterização avaliadas (1200, 1250 e 1300°C), contribuiu para um aumento na permeabilidade inicial, e uma redução na condutividade elétrica dc e fator de perdas. Esses resultados foram explicados em função da solubilidade do V_2O_5 na matriz ferrita.

Aoyama e colaboradores[12], Hirota e colaboradores[13] estudaram o efeito da adição de borossilicato de lítio vítreo pelo método de coprecipitação nas propriedades elétricas e magnéticas das ferritas de Mn-Zn. A concentração de 0,1% em peso de borossilicato de lítio vítreo melhorou a permeabilidade ($\mu > 1000$ a 100 kHz) e resultou no maior valor de resistividade elétrica (474 Ω m), devido à alta densidade relativa obtida (98%) e o tamanho médio de grão, entre 30-35 μ m. Os autores observaram a presença de poros intragranulares, resultantes do rápido crescimento do grão devido à sinterização por fase líquida causada pela adição do vidro.

Entre os métodos químicos estudados para obtenção de ferritas, o processo de síntese por reação de combustão tem sido empregado com sucesso visto que possibilita a obtenção de pós com partículas nanométricas e elevada área superficial. Este método de síntese torna-se vantajoso devido à sua simplicidade, pequeno tempo de duração entre a preparação de reagentes, o produto final não necessitar de etapas intermediárias de calcinação subsequente, e baixo consumo de energia envolvido durante a síntese[6]. Além do mais, possibilita a preparação de 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[14,15].

Com base neste contexto, no qual destaca-se a importância tecnológica das ferritas Ni-Zn, e as vantagens apresentadas pelo método de síntese por reação de combustão, este trabalho teve como objetivo preparar ferritas Ni-Zn dopadas com cromo via reação de combustão e sua caracterização morfológica e magnética, com o intuito de avaliar o

efeito do cromo nas propriedades estruturais e magnéticas nas ferritas Ni-Zn visando a aplicação desses pós como materiais magnéticos moles.

2. Materiais e métodos

O processo de síntese por reação de combustão 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 - $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ (Merck), nitrato de zinco - $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ (Merck), nitrato de ferro - $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ (Merck), nitrato de cromo - $Cr(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ (Merck) e uréia - $CO(NH_2)_2$ (Synth). Todos os reagentes envolvidos apresentam elevado grau de pureza. Para realização da síntese foi utilizado um cadinho de sílica vítrea como recipiente.

A composição inicial da solução baseou-se na valência total dos reagentes e oxidantes e redutores utilizando conceitos da química dos propelentes e explosivos [16]. Os elementos carbono, hidrogênio, níquel, zinco, ferro e cromo foram considerados redutores, com valências respectivas de 4⁺, 1⁺, 2⁺, 2⁺, 3⁺ e 3⁺. O oxigênio foi considerado como agente oxidante, tendo 2⁻ como valência. A valência do nitrogênio foi considerada zero por esse elemento ser considerado neutro, de acordo com Jain [16]. A valência total calculada dos nitratos metálicos através de uma soma aritmética partindo das valências dos reagentes oxidantes e redutores foi 40⁻, representando a forte oxidação dos nitratos. A valência utilizada para uréia foi 6⁺.

Os pós de ferrita com composição nominal $Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe_{2-x}Cr_xO_4$ ($x = 0,10; 0,20$ e $0,25$ mol de Cr^{3+}) foram designados F01, F02 e F025, respectivamente. Para a preparação de uma solução redox, os nitratos metálicos e uréia, de acordo com a composição estequiométrica, foram misturados em um cadinho de sílica vítrea e submetidos ao aquecimento direto na placa quente, a temperatura aproximada de 480°C, até a ocorrência da auto-ignição.

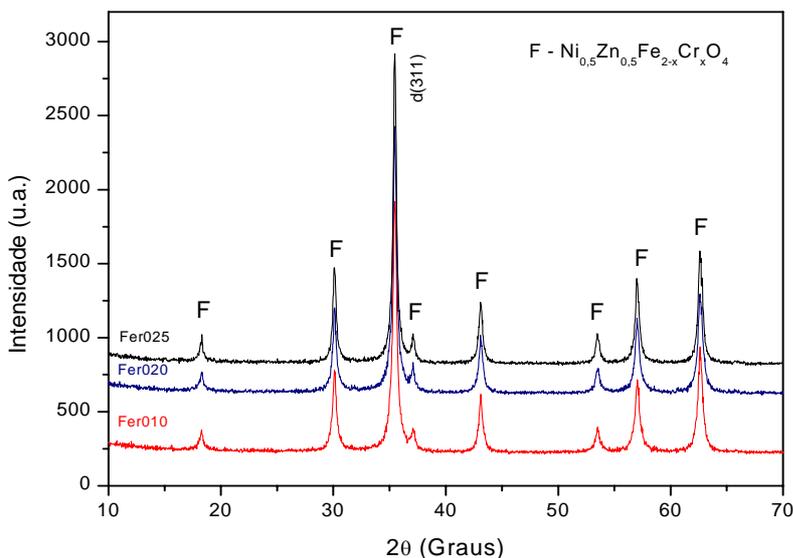
Os pós resultantes apresentaram aspecto de flocos porosos não volumosos de cor marrom e foram caracterizados por difratometria de raios-X (difratômetro de raios-X - SHIMADZU modelo XRD 6000, radiação Cu K que opera com tubo de alvo de cobre a uma voltagem de 40 kV e 40 mA de corrente); análise por espectroscopia de infravermelho usando pastilhas de KBr realizada em um equipamento Avatar, modelo 360 FT- IR e por microscopia eletrônica de varredura (MEV) (Microscópio ZEISS, modelo DSM 940) para visualização da morfologia dos aglomerados de partículas. O tamanho médio de cristalito foi calculado 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 [17]; Os ciclos de histerese magnética dos pós foram obtidos utilizando um Magnetômetro de Gradiente Alternado (AGM), operando em campo aplicado de -6000 até $+6000$. Os parâmetros magnéticos dos pós de ferritas Ni-Zn-Cr (campo coercivo, magnetização de saturação, magnetização remanente e perdas por histerese) foram obtidos a partir das curvas de histereses, observando-se o comportamento das curvas nas proximidades da origem do plano cartesiano. As perdas por histerese foram estimadas pela área da curva σ - H .

0,10; 0,20 e 0,25 moles de Cr^{3+}), obtidos por reação de combustão.

Os resultados de raios-X obtidos mostram que todas as composições desses pós apresentaram apenas formação da fase cristalina do espinélio inverso ferrita Ni-Zn-Cr (JCPDS 52-0278), sem que houvesse necessidade de serem submetidas a uma calcinação posterior e sem que fosse observada a presença de nenhuma fase secundária, especificamente, hematita ($\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$), como já relatada por outros pesquisadores [6-18]. Verificou-se ainda, que o aumento do teor de cromo no sistema ocasionou uma crescente elevação na intensidade dos picos característicos da fase ferrita Ni-Zn-Cr, indicando, assim, que os pós tornam-se mais cristalinos à medida que o teor de cromo é aumentado no sistema. Além disso, pode-se verificar que todos difratogramas apresentaram espectro de difração com um considerável alargamento, indicando, assim, a natureza nanométrica das partículas desses pós.

A Tabela I mostra as características dos pós de ferrita Ni-Zn dopadas com cromo (tamanho de cristalito determinado usando a equação Scherrer (de acordo com Klung [17]) e cristalinidade) obtidos por meio dos difratogramas de raios-X.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela I, podemos observar que a elevação de cromo causou um aumento na cristalinidade e conseqüentemente aumento no tamanho dos



3. Resultados e Discussão

A Figura 1 apresenta os difratogramas de raios-X para os pós de ferrita Ni-Zn dopadas com cromo com composição nominal $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_{2-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$ (onde $x =$

cristalitos.

A Figura 2 mostra o espectro vibracional na região do infravermelho dos pós de ferrita Ni-Zn-Cr obtidos por reação de combustão na faixa de $400 - 1400 \text{ cm}^{-1}$. El-Sayed [19], estudando a substituição de

Figura 1- Difratogramas de raios-X para os pós de ferrita Ni-Zn dopados com cromo.

íons de cromo por ferro em ferritas Ni-Zn pelo método convencional de mistura de óxidos, observou

duas principais bandas de absorção abaixo de 1000 cm^{-1} como características de todas as ferritas.

Tabela I - Características dos pós dos sistemas $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_{2-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$ com cromo obtidos por reação de combustão.

$\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_{2-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$	Tamanho de cristalito (nm)	Cristalinidade (%)
F01	21	77,4
F02	23	76,5
F025	26	80,6

Estas duas bandas ν_1 e ν_2 ocorrem em torno de 585 e 410 cm^{-1} , respectivamente. Segundo o autor, o deslocamento das vibrações na posição das bandas ν_1 e ν_2 ocorre mais efetivamente à medida que se eleva a concentração de cromo no sistema e que o maior deslocamento observado foi na vibração ν_2 , o qual foi atribuído à diminuição dos íons de ferro em consequência da substituição por íons de cromo na ferrita. A banda de absorção ν_1 é causada por estiramento de vibrações da ligação metal – oxigênio nos sítios tetraédricos, enquanto que a banda de absorção ν_2 é causada pelas vibrações da ligação metal-oxigênio nos sítios octaédricos [20]. Então a substituição de íons de ferro por íons de cromo nos sítios octaédricos, o qual possui menor raio iônico e maior massa atômica, é uma importante razão para se observar o deslocamento da banda na posição ν_2 com o aumento da concentração de cromo [21]. Devido à limitação do equipamento utilizado nessa pesquisa, foi possível observar muito

discretamente a banda de absorção a 414 cm^{-1} , porém a aproximadamente 506 cm^{-1} , observou-se uma banda de absorção ν_2 característica que indica a vibração da ligação metal-oxigênio nos sítios tetraédricos característicos da ferrita. Um leve deslocamento das bandas ν_2 foi observado com o aumento da concentração de cromo. Nos comprimentos de onda acima de 800 cm^{-1} , também foram observados alguns bandas de absorção que são característicos provavelmente da pastilha de KBr, com a qual foi realizado o experimento ou possivelmente de alguma vibração H-O-H proveniente de hidratação sofrida pelas amostras antes da análise. Bandas de absorção na faixa de $568 - 582\text{ cm}^{-1}$ também foram observadas nos estudos de Wu e Huang [22] e Li et al [23] quando avaliaram a preparação de nanocompósitos de ferritas Ni-Zn/ SiO_2 e ferrita Ni-Zn/polianilina, respectivamente.

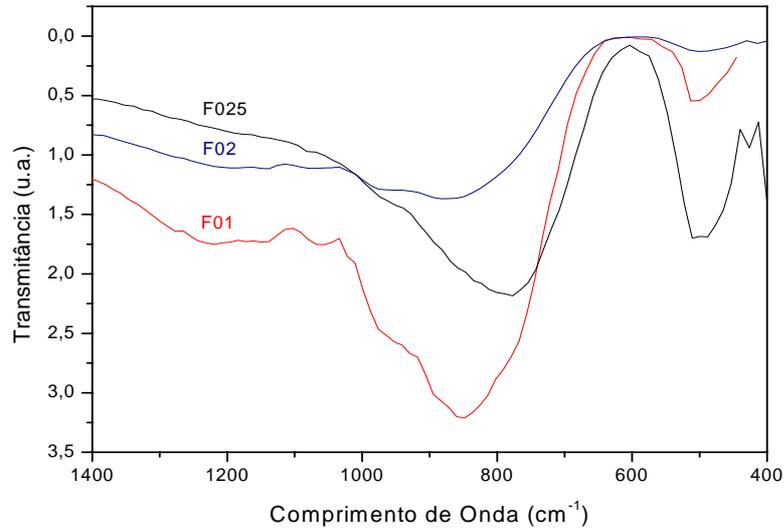
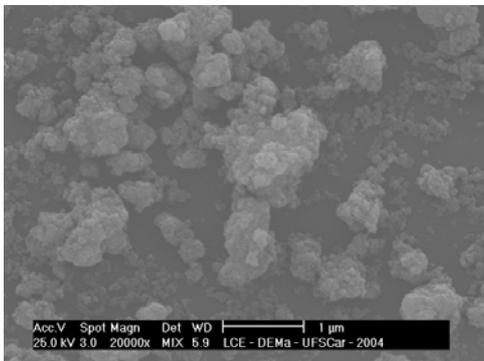


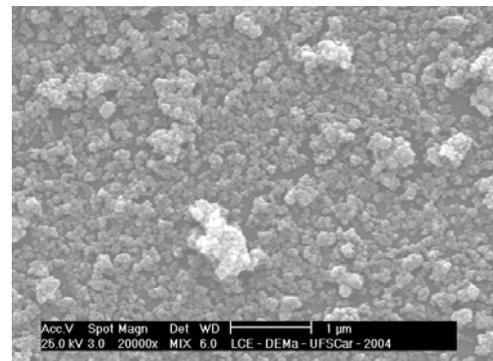
Figura 2 - Espectro vibracional na região do infravermelho dos pós de ferrita Ni-Zn-Cr obtidos por reação de combustão.

A Figura 3 exibe a morfologia, obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV),

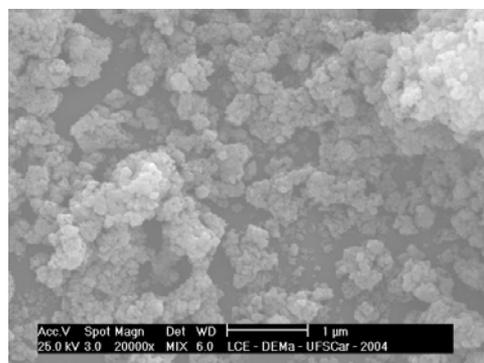
dos pós do sistema $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_{2-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$ preparadas por reação de combustão.



(a)



(b)



(c)

Figura 3 - Micrografias obtidas por MEV mostrando a morfologia do pó do sistema $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_{2-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$: a) F01; b) F02 e c) F025.

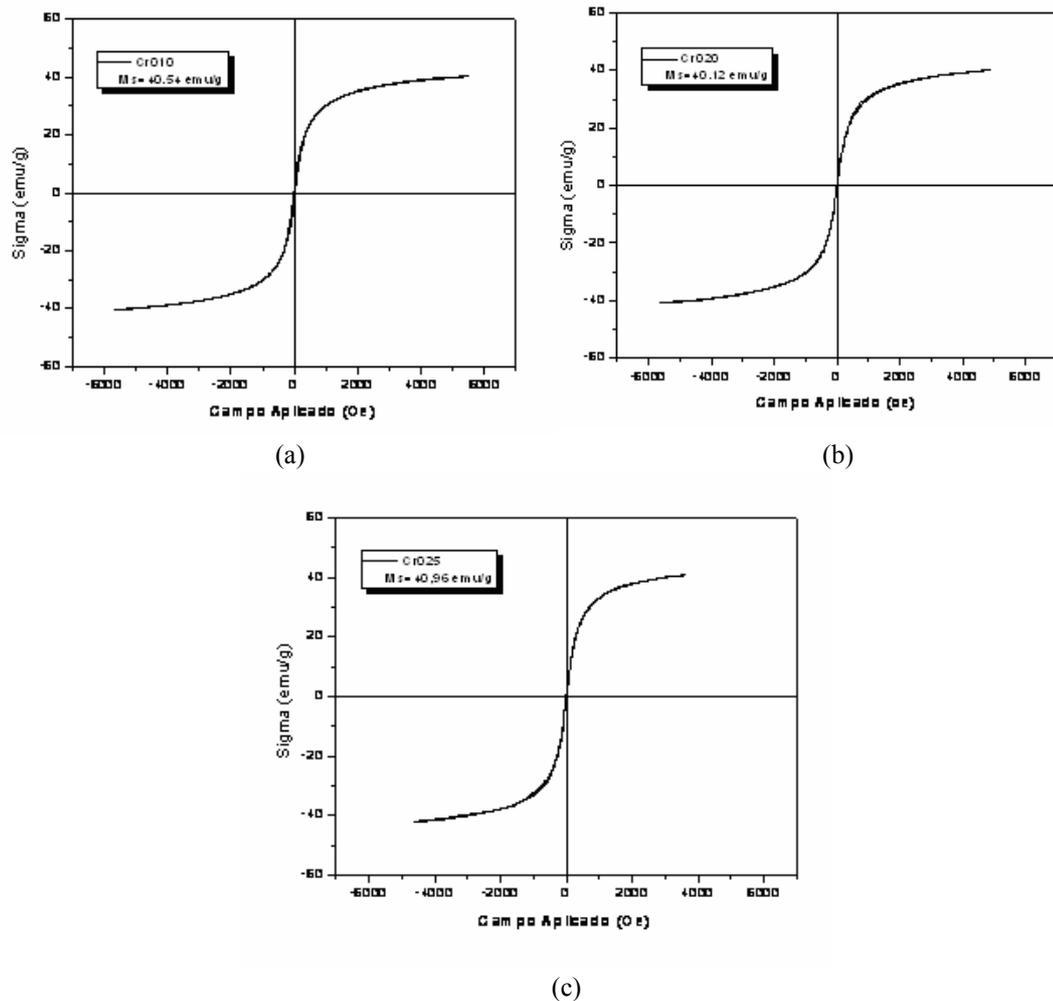


Figura 4 - Curvas de histereses dos pós correspondentes ao sistema $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_{2-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$: a) F01; b) F02 e c) F025.

Por meio das micrografias, verifica-se que as partículas do sistema ferrita Ni-Zn-Cr, para todas as composições avaliadas, são muito pequenas, o que acarretou na formação de aglomerados moles (constituídos por ligações fracas de Van der Waals) de partículas nanométricas para todos os sistemas estudados. O aumento da concentração de cromo parece influenciar o estado de aglomeração das partículas, tornando estes aglomerados maiores. Este comportamento pode ser observado quando comparamos os pós (F02) da micrografia da Figura 3b com o pó F025 da micrografia da Figura 3c. Os pós do sistema F020 apresentam um aglomerado menor e mais homogêneo que os aglomerados dos pós das demais composições. Assim, o estado de aglomeração dos pós aumenta com a adição de cromo no sistema ferrita Ni-Zn.

A Figura 4 exibe a dependência da magnetização (σ) em função do campo magnético aplicado (H) por meio do laço de histerese para os pós correspondentes $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_{2-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$ com $x = 0,10; 0,20$ e $0,25$ moles de cromo. Através dessas curvas foi possível determinar os valores de alguns parâmetros magnéticos, tais como: campo coercitivo (H_c), magnetização remanente (M_r ou σ_r) e magnetização de saturação (M_s ou σ_s). A magnetização de saturação foi determinada fazendo um fitting dos dados do campo aplicado para a função $\sigma = \sigma_s (1 - \alpha / H)$, onde σ é a magnetização, σ_s é a magnetização de saturação, α é o parâmetro do fitting e H é o campo aplicado.

De acordo com a Figura 4, pode-se verificar que todos os pós do sistema ferrita Ni-Zn-Cr apresentaram ciclo $\sigma \times H$ estreito, com

comportamento de material bastante mole (fácil magnetização e desmagnetização).

Os valores dos parâmetros de histerese calculados a partir dos gráficos da Figura 4 encontram-se dispostos na Tabela II.

Tabela II - Parâmetros de histerese dos pós correspondentes ao sistema ferrita Ni-Zn dopados com cromo.

Sistemas	H_c (kOe)	M_r (emu/g)	M_s (emu/g)	M_r/M_s	W_B (emu/g x kOe)
F01	30	2,7	40	0,07	4443
F02	11	0,6	40	0,01	1064
F025	11	0,4	41	0,01	3605

De uma forma geral, o efeito da adição do cromo no sistema causou um leve aumento da magnetização de saturação. Porém observamos que, à medida que aumentamos o teor de cromo na rede houve uma redução considerável no campo coercivo, com o valor desta redução em torno de 64%. Além do mais, observamos que a elevação da concentração de cromo nos pós de ferrita Ni-Zn, diminuiu a área das curvas de histerese em 76% quando consideramos um aumento de 0,1 de cromo em relação à amostra F01 e em 19% quando considerada a amostra F025, sendo, portanto, uma confirmação de que o cromo nesta rede de ferrita Ni-Zn reduz as perdas magnéticas consideravelmente. Diante disso, fica evidente que os pós de ferrita dopadas com cromo mostram-se adequados para serem utilizados como dispositivos magnéticos moles e podem ser considerados em situações em que as perdas magnéticas devam ser pequenas.

4. Conclusões

Os resultados obtidos no decorrer deste trabalho demonstraram que:

1. Os pós obtidos por reação de combustão apresentaram formação de fase cristalina ferrita Ni-Zn-Cr, com tamanho de cristalito de 21 a 26 nm, uma evidência de que a síntese é eficaz na produção de pós nanométricos.
2. A cristalinidade dos pós aumentou com o aumento do teor de cromo na rede espinélio ferrita Ni-Zn.
3. Os espectros de absorção na região do infravermelho apresentaram uma banda de

absorção ν_1 bastante discreta a 414 cm^{-1} correspondente as vibrações da ligação metal-oxigênio nos sítios octaédricos e uma banda de absorção característica ν_2 a aproximadamente 506 cm^{-1} que indica a vibração da ligação metal-oxigênio nos sítios tetraédricos característicos da ferrita.

4. Para todas as composições estudadas, houve formação de aglomerados moles (constituídos por forças fracas de Van der Waals) de nanopartículas. Entretanto, para os pós com maior teor de cromo, a morfologia dos aglomerados tornou-se menos homogênea e com tamanhos maiores.

5. O aumento da concentração de cromo aumentou levemente os valores de magnetização remanente e magnetização de saturação dos pós.

O acréscimo de cromo no sistema reduziu consideravelmente o campo coercivo em torno de 64% em relação à amostra com menor teor de cromo (F01) e a área do laço de histerese dos pós indicando, dessa maneira, uma grande redução das perdas em função da concentração de cromo. Este resultado faz com que essas ferritas dopadas com cromo sejam consideradas em aplicativos que exijam menores perdas magnéticas.

Referências

- [1] A. R. Bueno, L. C. F. L. Gomes, M. C. S. Nóbrega, Anais do 41º Cong. Bras. de Cerâmica, São Paulo, Vol.1 (1997) 135-138.

- [2] A. S. Albuquerque, J. Ardisson, W. A. A. Macedo, Anais do 41º Cong. Bras. de Cerâmica, São Paulo, Vol.1(1997) 142-145.
- [3] B. V. Bhise, M. B. Dongare, S. A. Patil, S. R. Sawant, J. Mater, Journal of Materials Science Letters 10, (1991) 922-924.
- [4] S. L. Pereira, L. C. B. Miranda Pinto, M. A. C. Bernuy & A. A. Mendes Filho, Anais do 41º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Vol. 1, 41 (1997) 129-131.
- [5] S. M. Rezende, A física de materiais e dispositivos eletrônicos, Editora da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil (1996) 392-411.
- [6] A. C. F. M. Costa, Síntese por reação de combustão, sinterização e caracterização de ferritas Ni- Zn, Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos (2002).
- [7] A. C. F. M. Costa, M. R. Morelli, R. H. G. A. Kiminami, Cerâmica 49, 311(2003).
- [8] M. Drofenik, A. Znidarsic, I. Zajc, Journal of Applied Physics 82, (1997) 333-340.
- [9] M. V. Kuznetsov, Q. A. Pankhurst, I. Parkin, Journal Physics D: Applied Physics 31, (1998) 2886-2893.
- [10] M. V. Kuznetsov, Q. A. Pankhurst, I. Parkin, Journal Materials Chemistry 8, (1998) 2701-2706.
- [11] G. C. Jain, B. Das, R. Tripathi, R. Narayan, Magnetism 18, 2 (1982) 776-778.
- [12] T. Aoyama, et al., Journal of Materials Science Letters 18, (1999) 497-499.
- [13] K. Hirota, et al., Journal of Magnetism and Magnetic Materials 205, (1999) 283-289.
- [14] A. Verma, Materials Science and Engineering B 60, (1999) 156-162.
- [15] A. Verma, T. C. Goel, R. G. Mendiratta, Frequency variation on initial permeability of NiZn ferrites prepared by the citrate precursor method 210, (2000) 274-278.
- [16] R. S. Jain, K. C. Adiga, Combustion and Flame 40, (1981) 71-79.
- [17] H. Klung, L. Alexander, X-ray diffraction procedures, New York: Wiley (1962).
- [18] K. Suresh, K. C. Patil, Journal of Materials Science Letters 13, (1994) 1712-1714.
- [19] A. M. El-Sayed, Ceramics International (2001) (in press).
- [20] R. D. Walorow, Infrared Spectra of ferrites, Phys. Rev. 99, (1955) 1727-1735.
- [21] N. K. Gill, R. K. Puri, Spectrochimica Acta. 41A, (1985) 1005-1008.
- [22] K. H. Wu, W. C. Huang, Journal of Solid State Chemistry 177, (2004) 3052-3057.
- [23] G. Li, S. Yan, E. Zhou, Y. Chen, Colloids and surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects 276, (2006) 40-44.