

PROPRIEDADES ELÉTRICAS DA FERRITA DE ESTRÔNCIO

R. R. Corrêa

Departamento de Eletroeletrônica – CEFET-MA
Av. Getúlio Vargas, 04, Monte Castelo, CEP 65000-000, São Luís-MA.
E-mail: proncor@yahoo.com.br

A.A.C. Junior

Departamento de Ciências Exatas – CEFET-MA
Av. Getúlio Vargas, 04, Monte Castelo, CEP 65000-000, São Luís-MA.
E-mail: aluisio@yahoo.com.br

Rd.R. Corrêa

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais – CEFET-MA
Av. Getúlio Vargas, 04, Monte Castelo, CEP 65000-000, São Luís-MA.
E-mail: pronrib@yahoo.com.br

RESUMO

Atualmente os fabricantes das máquinas elétricas como transformadores e motores de eletrodomésticos buscando melhor desempenho e menor consumo energético em seus equipamentos têm exigindo a utilização dos materiais com melhores propriedades, isto fez crescer novamente o interesse por pesquisas em ferritas, os pesquisadores passaram a explorar as características favoráveis destes materiais em várias aplicações. Foi possível observar que existem vantagens em processar ferrita de estrôncio por moagem de alta energia, uma vez que este método aplicado a algumas ferritas é recente e proporciona melhores propriedades que o método convencional. Observou-se nos gráficos de condutividade elétrica de que o comportamento da ferrita de estrôncio é de um semicondutor até certa temperatura, pois a medida que a temperatura aumentou houve aumento da condutividade. Nas amostras de ferrita de estrôncio em baixas temperaturas predominou o mecanismo de condução por bandas e em altas temperaturas houve diminuição da mobilidade do portador de carga. A condutividade elétrica das amostras de ferrita de estrôncio variou de $15,2(\Omega\text{cm})^{-1}$ a $85,0(\Omega\text{cm})^{-1}$ e a resistividade variou de $0,012\Omega\text{cm}$ a $0,066\Omega\text{cm}$. A ferrita de estrôncio apresentou baixos valores de resistência e valores de condutividade elétrica específica expressivos.

PALAVRAS CHAVES: ferrita, estrôncio , propriedade elétrica.

1. INTRODUÇÃO

A história das ferritas começa com a pesquisa de materiais ferromagnéticos de alta resistividade para obter perdas por correntes parasitas moderadas. Quando um material ferromagnético é imerso em um campo magnético alternado, correntes parasitas são geradas dissipando energia. Desde que as perdas por correntes parasitas em materiais ferromagnéticos são inversamente proporcionais a resistividade, elas podem ser minimizadas pelo uso de materiais magnéticos de alta resistividade. Portanto, elevada resistividade é imperativa em frequências de microondas quando a perda por corrente parasita é proporcional ao quadrado da frequência para materiais ferromagnéticos. As ferritas moles são usadas para a manufatura de núcleos indutores para telecomunicações, transformadores de potência, transformadores de alto fluxo; enquanto as ferritas duras são usadas como magneto permanente para estabelecer um campo magnético em uma região particular do espaço (Ichino e Narumeya, 1987).

Em sistemas como ferritas as propriedades elétricas são uma resposta a fatores tais como método de preparação, temperatura de sinterização, atmosfera de sinterização e composição química (Abo et al, 1999).

As propriedades elétricas das ferritas policristalinas também são sensíveis a microestrutura. O grão e o limite de grão são os dois principais componentes que determinam a microestrutura e conseqüentemente, as propriedades elétricas (Abdullah e Yusoff, 1996).

As ferritas são boas semicondutoras magnéticas com baixa condutividade elétrica e, baixas correntes parasitas. A condução nas ferritas é devido ao salto de elétrons entre íons Fe^{2+} e Fe^{3+} . A condutividade DC aumenta quando a temperatura aumenta. Este é o comportamento normal de semicondutor (El-Saadawy, 2000).

Nas ferritas observa-se que o mecanismo de condução por banda predomina em baixas temperaturas e é caracterizado por valores de condutividade elétrica baixa ($6 \times 10^{-4} - 2,5 \times 10^{-3} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$) e baixos valores de energia de ativação (0,056 – 0,098 eV), nesta região a condução é atribuída a impurezas e defeitos. Os mecanismos de condução por bandas e por salto predominam em temperaturas intermediárias e são caracterizados por valores de condutividade ($1,5 \times 10^{-3} - 1,2 \times 10^{-2} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$) e energia de ativação (0,32 – 0,67 eV) um pouco maiores. O mecanismo de condução por salto predomina em altas temperaturas e é caracterizado por alta condutividade ($1,8 \times 10^2 - 0,14 \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$) e baixa energia de ativação (0,048 – 0,086 eV) (El Hiti, 1999).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais de partida utilizados (carbonato de estrôncio- SrCO_3 e óxido de ferro- Fe_2O_3) foram misturados em um tempo muito curto (10min) para se obter uma mistura homogênea. A mistura dos materiais de partida obtida em pó foi levada a um forno para obtenção da fase desejada a uma temperatura de 1000°C. O pó obtido após a calcinação foi moído com tempos específicos (1, 5 e 10h) para diminuição do tamanho das partículas. A caracterização física foi feita para relacionar a evolução das propriedades com variações microestruturais resultantes das condições de moagem. Para isto foram utilizadas a difração de raios-x e medição de densidade aparente. A sinterização foi realizada em um forno Lindberg para melhorar a densidade das amostras. Observações por microscopia eletrônica de varredura permitiram o acompanhamento da evolução microestrutural das amostras em pó e sinterizadas. A caracterização elétrica consistiu na medição da condutividade elétrica cc (resistividade) e condutividade elétrica ca. A medição da condutividade elétrica foi realizada em corrente contínua, utilizando-se o método dos dois pontos. Os valores de resistividade foram determinados em função da temperatura, para cálculo das energias de ativação envolvidas no processo de condução eletrônica. Para coleta dos dados em corrente contínua (dc) foram utilizados os multímetros HP3457A e HP3458A, uma câmara de temperatura variável ($T_{\text{max}} = 723 \text{ K}$), um microcomputador com suporte HP-IB (placa) e o software “HPVEE 3.0” para interfaciar os equipamentos e auxiliar na coleta dos dados. A espectroscopia de impedância foi usada para investigar a dinâmica das cargas móveis no volume ou nas regiões interfaciais entre grãos. Na análise foram comparados ou ajustados os dados de impedância das amostras a um circuito elétrico equivalente, o qual representou o processo físico existente nas amostras em investigação. Para isto foi utilizado um sistema que compreendeu impedancímetro HP 4192A, forno controlado para variação de temperatura e software para aquisição e análise.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A figura 2 mostra a morfologia das amostras de ferrita de estrôncio obtidas após sinterização e a influência dos parâmetros de processamento (poder de moagem, tempo de moagem e temperatura de sinterização) na evolução da microestrutura dessas amostras.

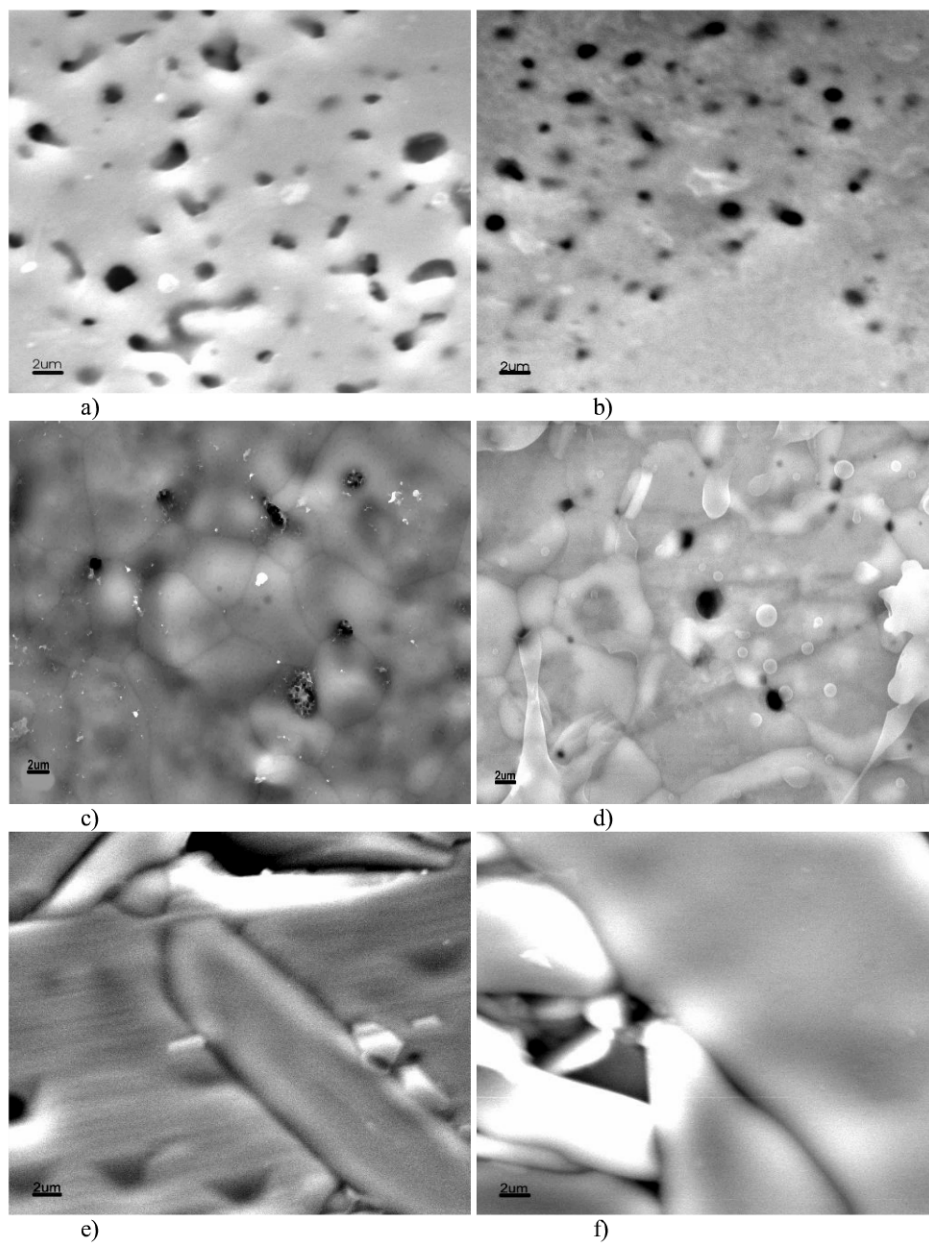


Figura 2 - Micrografias obtida no MEV com SE e aumento de 5000x das amostras de ferrita de estrôncio obtidas com: a)PM 4:1 TM 1h 1100oC, b)PM 4:1 TM 10h 1100oC, c)PM 4:1 TM 1h 1200oC, d)PM 4:1 TM 10h 1200oC, e)PM 4:1 TM 1h 1300oC e f)PM 4:1 TM 10h 1300oC.

As micrografias das amostras de ferrita de estrôncio sinterizadas a 1100oC mostradas na figura mostram a obtenção de uma microestrutura com grãos aglomerados em todos os tempos de moagem. O tamanho de grão médio também permaneceu constante em torno de 0,5µm em relação ao tempo de moagem. As micrografias das amostras

de ferrita de estrôncio sinterizadas a 1200°C mostram a obtenção de uma microestrutura mais densa do que a obtida a 1100°C e com grãos maiores. Tamanho de grão maior que 20µm foi encontrado em todos os tempos de moagem. As micrografias das amostras de ferrita de estrôncio sinterizadas a 1300°C mostram a obtenção de uma microestrutura com forma de grão predominantemente acicular. Grãos com crescimento exagerado são observados em todas as amostras obtidas a 1300°C, tamanho de grão maior que 40µm foi encontrado em todos os tempos de moagem.

A figura 3 mostra a variação da condutividade elétrica com a temperatura, representada no diagrama de Arrhenius para as amostras de ferrita de estrôncio.

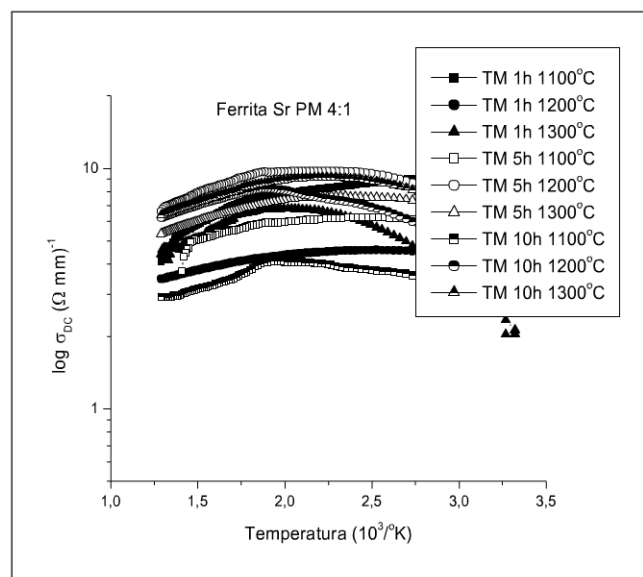


Figura 3 - Gráficos de $\log \sigma_{DC} \times 1000/T$ das amostras de ferrita Sr com PM 4:1.

Observa-se nos gráficos de condutividade elétrica dc que o comportamento das ferritas de estrôncio é de um semicondutor até certa temperatura, pois a medida que a temperatura aumentou houve aumento da condutividade. Observa-se também que há mudança de inclinação no gráfico de todas as amostras de ferrita de estrôncio. A mudança de inclinação indica a presença de regiões (ferromagnética e paramagnética) com energia de ativação diferentes para a mobilidade dos portadores de carga. Nas amostras de ferrita de estrôncio em baixas temperaturas predomina o mecanismo de condução por bandas e em altas temperaturas há diminuição da mobilidade do portador de carga. A partir da relação de Arrhenius, foram calculados os valores da energia de ativação em cada uma das curvas como mostrados na tabela I.

Tabela I - Valores da condutividade elétrica e energias de ativação na região ferromagnética e paramagnética das amostras de ferrita de estrôncio.

Amostras	Condutividade elétrica (Ωcm)-1	Ea(ferro) - eV	Ea(para) - eV
PM 4:1 TM 1h 1100oC	72,7	5,82E-06	4,66E-05
PM 4:1 TM 1h 1200oC	41,2	7,67E-06	8,72E-06
PM 4:1 TM 1h 1300oC	53,9	3,38E-05	2,21E-05
PM 4:1 TM 5h 1100oC	22,9	1,09E-05	1,33E-04
PM 4:1 TM 5h 1200oC	85,0	1,91E-05	1,88E-05
PM 4:1 TM 5h 1300oC	66,6	2,58E-05	1,59E-05
PM 4:1 TM 10h 1100oC	35,1	8,49E-06	2,29E-05
PM 4:1 TM 10h 1200oC	69,2	2,1E-05	1,85E-05
PM 4:1 TM 10h 1300oC	78,5	2,05E-05	1,64E-05

Observa-se na tabela I que a condutividade elétrica das amostras de ferrita de estrôncio variou de $22,9(\Omega\text{cm})^{-1}$ a $85,0(\Omega\text{cm})^{-1}$ e a resistividade variou de $0,012\Omega\text{cm}$ a $0,066\Omega\text{cm}$. A amostra obtida com poder de moagem 4:1, tempo de moagem 5h e temperatura de sinterização de 1200°C apresentou a maior condutividade elétrica. Também observa-se que para as amostras de ferrita de estrôncio o maior valor da energia de ativação na

região de alta temperatura (paramagnética) foi de $1,33 \times 10^{-4}$ eV e na região de baixa temperatura (ferromagnética) de $3,38 \times 10^{-5}$ eV.

A resposta a aplicação de uma corrente alternada nas ferritas de estrôncio foi avaliada através da observação do comportamento da impedância nas amostras. Medidas em corrente alternada permitem avaliar a contribuição do grão e contorno de grão na condutividade. A figura 4 mostra os diagramas de impedância das amostras de ferrita de estrôncio obtidos por espectroscopia de impedância a temperatura de 500°C.

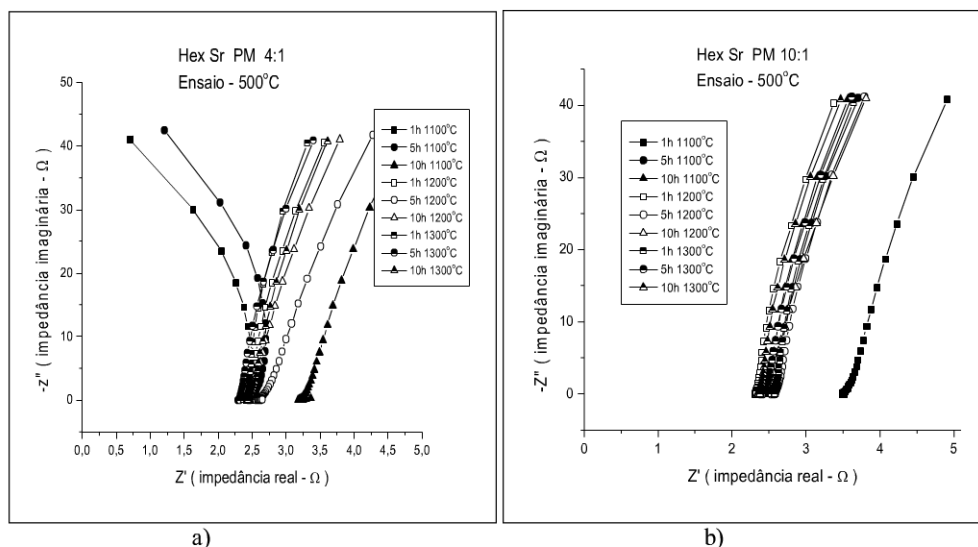


Figura 4 - Diagramas de impedância complexa obtidos a temperatura de 500°C: a) amostras de ferrita de estrôncio com PM 4:1 e b) amostras de ferrita de estrôncio com PM 10:1.

Observa-se ainda na figura 4 que as amostras de ferrita de estrôncio obtidas com poder de moagem 4:1 (Sr 4111 e Sr 4511) apresentam dentro da faixa de frequência utilizada e temperatura de ensaio de 500°C a formação de um semicírculo incompleto caracterizando um comportamento capacitivo, as demais amostras apresentam a formação de uma reta caracterizando um comportamento indutivo, para poder de moagem de 10:1 todas as amostras apresentam a formação de uma reta caracterizando um comportamento indutivo, na faixa de frequência e na temperatura de ensaio utilizada. A presença de um único semicírculo com o poder de moagem 4:1 indica que a maior contribuição para a resposta elétrica dessas amostras é dada pelo grão no limite de alta frequência. A mudança da posição dos interceptos das curvas de impedância com o eixo de impedância real das amostras obtidas indica uma redução da resistividade do grão e contorno de grão (resistividade total) em baixa frequência. Analisando as curvas do diagrama de impedância mostradas na figura 4, utilizando o programa de análise spect, obteve-se os valores de resistência do grão, capacitância do grão e condutividade específica σ_s do grão mostrados na tabela II.

Tabela II - Valores de resistência, capacitância e condutividade elétrica específica do grão, obtidos com as amostras de ferrita de estrôncio ensaiadas a 500oC.

Amostras	Rg (Ω)	Cg (Farad)	$\sigma_{sg} (\Omega cm)^{-1}$
Sr 4111	2,46	1,21E-10	8,50E-02
Sr 4511	2,44	5,44E-11	9,43E-02
Sr 41011	3,21	indutivo	7,48E-02
Sr 4112	2,41	indutivo	7,95E-02
Sr 4512	2,59	indutivo	9,27E-02
Sr 41012	2,38	indutivo	1,01E-01
Sr 4113	2,36	indutivo	9,75E-02
Sr 4513	2,32	indutivo	9,91E-02
Sr 41013	2,43	indutivo	1,03E-01
Sr 1011	3,49	indutivo	6,25E-02
Sr 10511	2,57	indutivo	9,73E-02
Sr 101011	2,48	indutivo	9,68E-02
Sr 1012	2,32	indutivo	1,03E-01
Sr 10512	2,59	indutivo	9,27E-02
Sr 101012	2,39	indutivo	1,12E-01
Sr 1013	2,57	indutivo	8,95E-02
Sr 10513	2,43	indutivo	1,07E-01
Sr 101013	2,41	indutivo	1,04E-01

A presença de semicírculo para algumas amostras da ferrita de estrôncio e a presença de reta partindo do eixo de impedância real para outras amostras, indicam uma resposta capacitiva e indutiva respectivamente das amostras para o sinal alternado aplicado no limite de frequência utilizado (5Hz – 13MHz). Isto quer dizer que as amostras apresentaram uma reatância capacitiva ou indutiva que aumentou a impedância influenciando na condução de corrente elétrica pelas amostras.

4. CONCLUSÕES

A maioria das amostras da ferrita de estrôncio apresentaram uma microestrutura com a fase desejada porém com mais porosidade nas amostras obtidas a temperatura de sinterização de 1100oC, o que influenciou na obtenção de alguns valores de condutividade elétrica a esta temperatura de sinterização. A condutividade elétrica na ferrita de estrôncio foi fortemente influenciada pela microestrutura. Nas amostras da ferrita de estrôncio a resposta ao sinal CC aplicado caracteriza um comportamento semicondutivo, pois a resistividade diminuiu com o aumento da temperatura e a energia de ativação permaneceu dentro do limite dos semicondutores.

O aumento na temperatura de sinterização foi responsável pela densificação das amostras e crescimento dos grãos na forma de lâmina.

É muito importante desenvolver uma microestrutura uniforme, com grãos de tamanhos pequenos e uniformemente distribuídos, para obter boas propriedades em ferrita de estrôncio. A moagem de alta energia permitiu obter propriedades variando com as condições de moagem e temperatura de sinterização, possibilitando um amplo limite de escolha das propriedades para diversas aplicações.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdullah, M.H. and Yusoff, A.N. **Complex impedance and synthesize properties of an Mg-Zn ferrite**. Journal of Alloys and Compounds, 1996, vol. 233, pp. 129-135.
- Abo, A.M.; Ata, E. and Nimr, M.K. **Conduction mechanism of $BaCO_{2-x}Ni_xFe_{16}O_{27}$** . Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1999, vol. 202, pp. 397-404.
- El-Saadawy, M. **Dc conductivity for hexaferrites of the $Zn_{2-x}Cu_xBa_1Fe_{16}O_{27}$ system**. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2000, vol. 219, pp. 69-72.
- El Hiti, M.A. and El Ata, A.M. **Semiconductivity in $Ba_2Ni_{2-x}Zn_xFe_{12}O_{22}$ y type hexaferrites**. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1999, vol. 195, pp. 667-678.

Ichino, K. and Narumeya, Y. **Development of magnetic ferrites: control and application of losses.** American Ceramic Society Bulletin, 1987, vol. 66, p. 1469–1474.

