

# Caracterização Magnética de Ferritas Mn-Mg para Aplicações em Dispositivos de RF e Microondas

J. T. Alves<sup>1</sup>, J. E. J. Ferreira<sup>1</sup>, L. V. Lemos<sup>1</sup>, A. C. C. Migliano<sup>2</sup>, C. A. R. de Freitas<sup>2</sup> e V. L. O. de Brito<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, SP e <sup>2</sup>Instituto de Estudos Avançados (IEAv), São José dos Campos, SP

**Resumo** — Em meados da década de 80, no Instituto de Estudos Avançados – IEAv, para atender as necessidades do projeto do Acelerador Linear de Elétrons (LINAC), foram desenvolvidas tecnologias que serviram de partida para a inserção dos pesquisadores em P&D de várias outras tecnologias. A fim de nacionalizar dispositivos do LINAC, materiais foram desenvolvidos com características de resposta em frequências na faixa de RF e microondas. Como exemplo, tem-se as cargas de dissipação de RF do sistema de potência e os monitores de correntes pulsada utilizados no sistema de diagnóstico do feixe de elétrons do LINAC-IEAv. Essa mesma tecnologia de sensores de RF permitiu o avanço tecnológico do IEAv para o desenvolvimento de transdutores cerâmicos com aplicações em sensores de pulso de corrente de curta duração (alguns nanossegundos). Podem-se citar as ferritas Mn-Mg e Ni-Zn como alguns dos materiais estudados. Assim, este trabalho apresenta uma discussão sobre as etapas críticas no processo de fabricação desses materiais e as suas influências sobre as suas propriedades magnéticas.

**Palavras-chaves** — Cerâmicas magnéticas, ferritas, microondas, sinterização, permeabilidade magnética complexa.

## I. INTRODUÇÃO

O método mais comum de confecção de ferritas, o cerâmico, tem seu controle de processo realizado em função de parâmetros, tais como: o tamanho e a morfologia das partículas utilizadas como matéria-prima; a estequiometria do composto; o módulo da pressão empregada para a compactação da mistura dos óxidos; a composição da atmosfera de sinterização, etc. A produção em escala industrial, empregando-se este método, tem seu controle de processo baseado em poucos desses parâmetros, pois os ensaios físicos aplicados sobre as peças extraídas dos lotes fabricados, em cada etapa do processo, levam tempo e conduzem a custos inaceitáveis de produção. No entanto, algumas falhas do processo são tentativamente corrigidas e a avaliação do acerto é realizada por meio de ensaios que aferem os parâmetros finais do material corrigido. Tratando-se de cerâmicas magnéticas, alguns dos parâmetros de aceitação são os valores das partes reais da permeabilidade magnética e da permissividade elétrica e, neste sentido, este trabalho apresenta uma discussão sobre os riscos de aceitação do ajuste em função da dispersão da permeabilidade e permissividade. Em particular, as falhas do processo de sinterização podem ser identificadas em função das perdas

J. E. J. Ferreira, rasgador@ita.br, Tel +55-12-3947-3704; L. V. Lemos, violim@ita.cta.br, Tel. +55-12-3947-5564.

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Sistemas Eletromagnéticos e no Laboratório de Materiais Eletromagnéticos.

magnéticas e elétricas dos materiais ajustados. Neste trabalho foram estudados os efeitos sobre as dispersões da permeabilidade e permissividade complexas, considerando falhas no processo de sinterização de amostras de Mn-Mg. Cerâmicas deste tipo[1] são utilizadas em transdutores de sensores de corrente[2,3] e de presença de RF no Acelerador Linear de Elétrons do Instituto de Estudos Avançados (LINAC-IEAv).

## II. TÉCNICA NICOLSON-ROSS-WEIR (NRW)

Considerando-se uma linha coaxial de ar de impedância característica  $Z_0$  ( $=50\Omega$ ), parcialmente preenchida por uma amostra com parâmetros eletromagnéticos  $\mu_r^*$  e  $\epsilon_r^*$ , em forma de disco anular de comprimento L, conforme apresentada na Fig. 1. A impedância característica do material pode ser expressa por:

$$Z_s = \sqrt{\frac{\mu_r^*}{\epsilon_r^*}} Z_0 \quad (1)$$

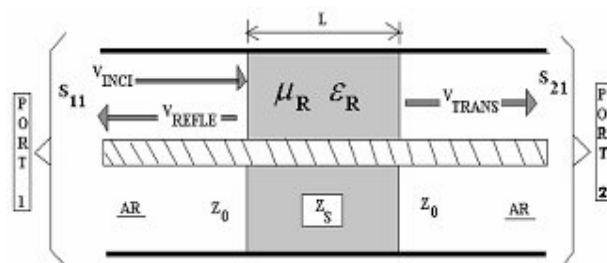


Fig. 1 – Esquema de linha coaxial de ar utilizada como porta-amostra, para aplicar os conceitos T/R. A imagem apresenta as interfaces das regiões de ar (branco) e preenchida (cinza) pelo material magnético[4].

Pela técnica de Nicolson-Ross-Weir (NRW)[4], têm-se as equações:

$$C_1 = \left(\frac{1+\Gamma}{1-\Gamma}\right)^2 = \frac{\mu_r}{\epsilon_r} \quad (2)$$

e

$$C_2 = -\left(\frac{c}{\omega L} \ln\left(\frac{1}{T}\right)\right)^2 = \mu_r \varepsilon_r, \quad (3)$$

onde  $c$  é a velocidade da luz,  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  é a frequência,  $L$  é o comprimento da amostra e  $T (>0)$  é o coeficiente de transmissão.

A equação (3) tem um infinito número de raízes para materiais magnéticos, desde que o logaritmo de um número complexo possui múltiplas raízes, ou seja:

$$\ln(T) = \ln|T| + j(\theta + 2\pi n), \quad \text{onde } n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (4)$$

Relacionando (2) e (3) tem-se:

$$\mu_r^* = \sqrt{C_1 C_2} \quad (5)$$

e

$$\varepsilon_r^* = \sqrt{\frac{C_2}{C_1}} \quad (6)$$

Para se selecionar a correta raiz para um único valor de  $\mu_r^*$  e de  $\varepsilon_r^*$  em cada frequência  $f$ , é necessário comparar o atraso de grupo medido com o atraso de grupo calculado, isto é,

$$\tau_{\text{GrupoCalculado}} = \tau_{\text{GrupoMedido}} \quad (7)$$

O atraso de grupo calculado é dado por:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{GrupoCalculado}} &= -L \frac{d}{df} \sqrt{\frac{\varepsilon_r^* \mu_r^* f^2}{c^2} - \frac{1}{\lambda_c^2}} = \\ &= -\frac{1}{c^2} \frac{f \varepsilon_r^* \mu_r^* + f^2 \frac{d(\varepsilon_r^* \mu_r^*)}{df}}{\sqrt{\frac{\varepsilon_r^* \mu_r^* f^2}{c^2} - \frac{1}{\lambda_c^2}}} \cdot L, \end{aligned} \quad (8)$$

onde  $\lambda_c$  = comprimento de onda de corte.

Trabalhando-se no modo TEM[4], onde se obtém a maior faixa de frequência, (8) será simplificada, pois a frequência de corte  $f_c \cong 0$ .

O atraso de grupo medido é dado por:

$$\tau_{\text{GrupoMedido}} = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi}{df}, \quad (9)$$

onde “ $\phi$ ” é a fase de  $T$  (coeficiente de transmissão).

### III. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Peças de um tipo de ferrita Mn-Mg, fornecidas pela Philips Co., foram trituradas de forma a se obter um pó com

partículas de tamanho menor que 10  $\mu\text{m}$ . Este pó foi submetido a ciclos de dosagem de radiação de microondas, de potências superiores a  $2\text{W}/\text{cm}^2$ , durante testes para aplicações em sensores de RF. Medidas de calor específico foram realizadas simultaneamente nesse teste. Após este estresse aplicado, amostras foram formadas por prensagem uniaxial de ação dupla, com módulo de pressão de 50 MPa. Foram formadas quatro amostras toroidais com diâmetro interno maior que 3,05 mm e diâmetro externo menor que 7,00 mm, de forma a preencher um conector do tipo N, utilizado como porta-amostra nos ensaios de NRW. Os comprimentos das amostras variaram entre 6 e 9 mm.

Considerando-se como ciclo térmico ideal: aquecimento e resfriamento a  $200^\circ\text{C}/\text{h}$  e patamar de 2h a  $1300^\circ\text{C}$ , foram introduzidas falhas na aplicação deste ciclo térmico, obtendo-se as condições a seguir. Após falha no processo de sinterização, com a queda do patamar antes do tempo estipulado, foi obtida a amostra 1F1 e, após a aplicação do ciclo térmico ideal, a mesma amostra foi denominada 1F1R (1F1 recuperada). Após falha no processo de sinterização, com a diminuição da taxa de aquecimento ( $170^\circ\text{C}/\text{h}$ , aproximadamente) e redução de 1h do tempo no patamar de temperatura, foi obtida a amostra 1F2 e, após a aplicação do ciclo térmico ideal, a mesma amostra foi denominada 1F2R. As amostras 1SF e 2SF são amostras que passaram pelo ciclo térmico ideal, isto é, sem falhas no ciclo térmico aplicado.

As medidas de permeabilidade e permissividade complexas das amostras foram feitas em um analisador de redes 8722ES, da Agilent Co., calibrado. As medidas foram realizadas na faixa de frequência de 200 MHz a 1.2 GHz. A descrição da técnica empregada nas medições de  $\mu_r^*$  e  $\varepsilon_r^*$  é a mesma apresentada em [4].

### IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados dos ensaios de  $\mu_r^*$  e  $\varepsilon_r^*$  são apresentados nas Figs. 2-5. Na faixa de frequência estudada, os valores de  $\mu_r^*$  e  $\varepsilon_r^*$  não apresentaram variações significativas. No entanto, observa-se uma leve inclinação negativa para a parte imaginária da permeabilidade até 800 MHz. Acima dessa frequência, observa-se um patamar de perdas. A parte real da permeabilidade apresentou uma leve inclinação negativa por toda a faixa estudada, caracterizando uma região posterior à frequência de relaxação. A permissividade apresenta uma leve inclinação positiva, até 1,1GHz, tanto para a parte real quanto para a parte imaginária. Acima dessa frequência, ocorre uma abrupta queda da parte real da permissividade e das perdas.

Observa-se que as curvas de  $\mu'$  (Fig. 2) de todas as amostras situam-se numa faixa estreita de permeabilidade, entre 1,5 e 3. Para a amostra 1F1, os valores de  $\mu'$  são menores que os valores das amostras submetidas ao ciclo térmico ideal (1SF e 2SF). Após a tentativa de recuperação com um tratamento térmico, os valores de  $\mu'$  não foram alterados. Os valores de  $\mu'$  da amostra 1F2 não sofreram alterações, por toda a faixa de frequência. Após o tratamento térmico de tentativa de recuperação, os valores de  $\mu'$  ficaram mais ajustados aos valores de permeabilidades das amostras 1SF e 2SF.

As perdas (Fig. 3),  $\mu''$ , para as amostras que sofreram falhas no processo de sinterização, foram maiores. Este comportamento era o esperado em função de possíveis

tensões mecânicas introduzidas ou alterações microestruturais. Após o tratamento térmico de tentativa de recuperação, as perdas da amostra 1F1R foram reduzidas, enquanto que as da amostra 1F2R não sofreram alterações. A recuperação da amostra 1F1 foi efetivada por ter sido submetida anteriormente a um tratamento térmico incompleto, enquanto que a amostra 1F2 foi submetida a um ciclo térmico que proporcionou uma formação estrutural irreversível com o tratamento térmico ideal. Neste último caso, a alteração poderia ocorrer com temperatura de sinterização maior, ou intervalo de tempo maior para o patamar de temperatura.

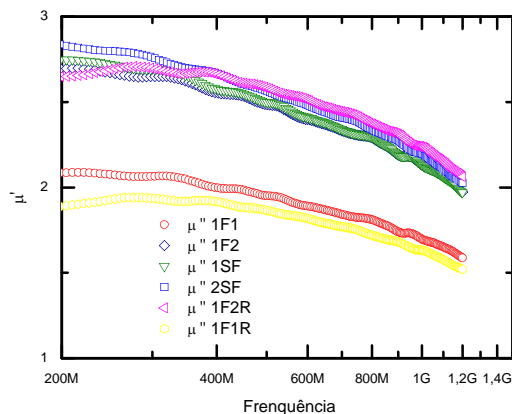


Fig. 2 – Partes reais das permeabilidades magnéticas das amostras.

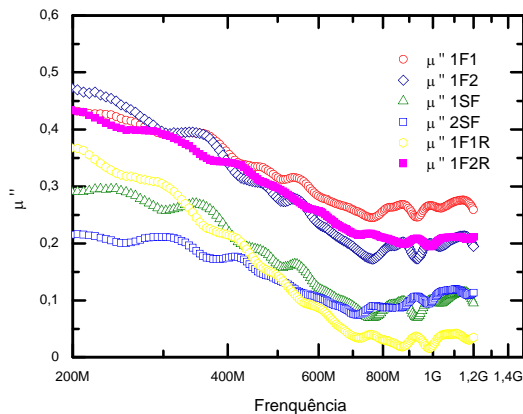


Fig. 3 – Partes imaginárias das permeabilidades magnéticas das amostras.

Os valores de  $\epsilon'$  (Fig. 4) das amostras situam-se também numa faixa estreita, entre 6 e 12, sendo que para amostras sem tentativa de recuperação, essa faixa fica reduzida entre 8 e 11,5. Assim, considera-se que não ocorreram variações significativas nas amostras com falhas nos processos de sinterização. Após a tentativa de recuperação (1F1R e 1F2R), os valores de  $\epsilon'$  sofreram reduções. Diferentemente de  $\epsilon'$ , após o tratamento térmico de tentativa de recuperação, as perdas,  $\epsilon''$ , foram reduzidas, conforme apresentado na Fig. 5.

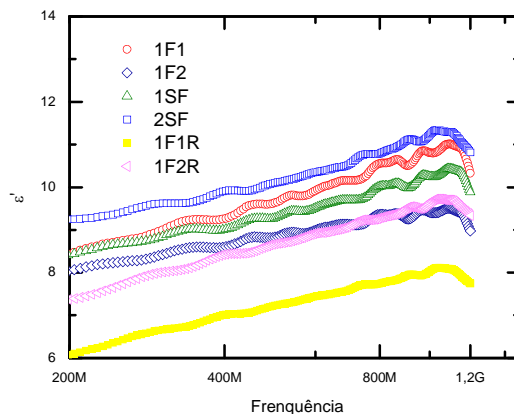


Fig. 4 – Partes reais das permissividades elétricas das amostras.

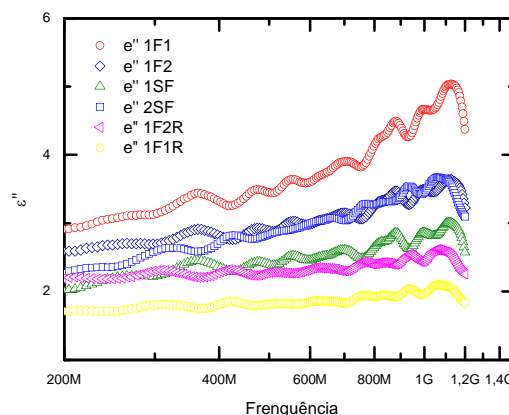


Fig. 5 – Partes imaginárias das permissividades elétricas das amostras.

## V. CONCLUSÃO

Para este tipo de ferrita observou-se que os melhores parâmetros para se aferir a qualidade, após tentativa de recuperação, são as perdas magnéticas e dielétricas. Dependendo da falha no processo de sinterização, a tentativa de recuperação aplicando-se o ciclo térmico “ideal”, apresenta-se inócua. Para casos de tratamento térmico incompleto, caracterizado por ciclo térmico com duração de tempo muito menor que o do ideal e com temperatura máxima atingida durante o processo menor ou igual ao do ideal, pode-se obter resultados aceitáveis para os parâmetros finais de qualidade.

## VI. AGRADECIMENTOS

Aos professores e colaboradores dos Laboratórios de Sistemas Eletromagnéticos e de Materiais Eletromagnéticos do Instituto de Estudos Avançados pelos materiais e equipamentos disponibilizados. Agradecemos ao servidor Luis Fernando de Figueiredo Bernabe pelo apoio.

## REFERÊNCIAS

- [1] Brito, V. L. O.: Cerâmica Vol. 52 (324) (2006), p. 221.
- [2] De Polli, Y. C., Migliano, A. C. C., Stopa, C. R. S., Nabeta, S. I., Cardoso, J. R., “Finite element analysis of impedance of an electron

beam current monitor”, IEEE Trans. on Magnetics, v. 35, n. 3, p. 1833-1836, 1999.

[3] Brito, V. L. O.. Seleção, elaboração e caracterização de ferritas Ni-Zn para aplicação em monitores de corrente pulsada. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Tese de Doutorado, 2007.

[4] Santos, C. N., Técnica de determinação da permeabilidade e permissividade da ferrita de Ni-Zn na faixa de frequência de 50-200MHz. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Tese de Mestrado, 2008.