

SEPARAÇÃO DE PERDAS TOTAIS EM FERRITA DE MnZn PARA DIFERENTES TEMPERATURAS¹

Victoria Lázaro-Colán²

Suzilene Real Janasi³

Jeanete Leicht⁴

Fernando José Gomes Landgraf⁵

Resumo

As perdas magnéticas das ferritas de manganês zinco foram amplamente estudadas devido a suas baixas perdas magnéticas, se comparadas com os materiais metálicos magnéticos. As perdas magnéticas das ferritas de MnZn mostram uma conhecida dependência com a temperatura. Foram realizados ensaios de 5000 – 100000Hz a partir de 25 até 100°C, a 200mT com o objetivo de avaliar quais os parâmetros que controlam o efeito da temperatura nas perdas magnéticas. Foi observado que na curva de perda total existe uma temperatura de mínimo de perda por volta de 60°C. O mesmo comportamento foi observado na curva da perda histerética, o que já era esperado, pois a mesma varia com a constante de anisotropia magnetocristalina (K_1).

Palavras-chave: Ferrita manganês zinco; Propriedades magnéticas; Perdas magnéticas.

MAGNETIC LOSS SEPARATION OF MnZn FERRITE FOR DIFFERENT TEMPERATURES

Abstract

Magnetic losses of MnZn ferrites have been intensively investigated due to their low magnetic loss, compared to metallic magnetic materials. The magnetic losses show a well known temperature dependence. The analysis have been carried out through 5000 to 100000Hz from 25 until 100°C, at 200mT with the aim to evaluate which parameters control the effect of the temperature in the magnetic losses. It was observed that in the curve of total losses exists a temperature of the minimum loss around 60°C. The same behavior was observed in the curve of the hysteresis loss, which it was already expected, since it varies with the magnetocrystalline anisotropy constant (K_1).

Key words: Manganese zinc ferrite; Magnetic properties; Magnetic losses.

¹ Contribuição técnica ao 63° Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1° de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil

² Doutoranda do Programa de Pós Graduação do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da EPUSP.

³ Pesquisadora bolsista do programa PIPE, FAPESP.

⁴ Pesquisadora do Laboratório de Metalurgia e Materiais Cerâmicos do IPT.

⁵ Professor do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da EPUSP.

1 INTRODUÇÃO

As perdas magnéticas das ferritas de manganês zinco foram amplamente investigadas devido a sua alta resistividade elétrica e baixas perdas, se comparadas com os materiais metálicos magnéticos.^(1,2)

As perdas magnéticas das ferritas de MnZn mostram uma conhecida dependência com a temperatura.^(1,3) A temperatura de perda mínima (T_{min}) é de preferência ao redor de 80°C, porque comumente o núcleo de transformador funciona nessa temperatura. Porém, foi observado que esta temperatura diminui muito mais que a temperatura desejada quando a frequência é aumentada, especialmente na faixa de MHz.⁽¹⁾

Sabe-se que a composição química e o grau de oxidação das ferritas de MnZn são os parâmetros mais importantes que modificam T_{min} . As perdas são divididas em três componentes, perda histerética (Ph), perda parasita (Pe) e perda residual (Pr). As proporções destes componentes nas perdas totais variam amplamente de acordo com as condições de medida tais como frequência e densidade de fluxo magnético. A baixas frequências, a perda histerética é dominante, enquanto a frequências mais altas (>500 kHz), as perdas por corrente parasita e residual dominam.^(3,4)

As ferritas de MnZn são as mais adequadas para faixas de frequência onde a perda histerética desempenha uma função importante. A anisotropia magnetocristalina das ferritas de MnZn pode ser minimizada por compensação anisotrópica devido aos íons de Fe^{2+} . A compensação é tal que a anisotropia magnetocristalina como uma função da temperatura T mostra um mínimo.

Como uma consequência, $Ph(T)$ mostra um mínimo. A posição deste mínimo pode ser localizada na temperatura de trabalho planejada da ferrita, selecionando um excesso adequado de Fe e ajustando a pressão parcial de oxigênio da atmosfera de sinterização. Usualmente a temperatura de trabalho escolhida está entre 80°C-100°C, permitindo um aumento de temperatura acima da temperatura ambiente do equipamento eletrônico devido a uma inevitável dissipação de calor de 40°C-60°C.⁽⁵⁾

A perda histerética é a energia perdida em magnetizar e desmagnetizar o material. Os fatores que governam a perda histerética incluem a anisotropia magnetocristalina K_1 , a magnetostrição λ , a fração do volume de inclusões (poros, impurezas, defeitos), e a magnetização de saturação M_s . Para diminuir a perda histerética, os valores de todos esses fatores devem ser baixos, exceto M_s .

A magnetização de saturação é predominantemente governada pela composição e a densidade. Poros e fases não magnéticas enfraquecem a força magnética da ferrita. A anisotropia magnetocristalina é uma medida do efeito que a estrutura cristalina tem no alinhamento dos domínios.⁽¹⁾ O comportamento das perdas em função da temperatura, a uma frequência e campo magnético constantes, é determinado pelo comportamento da permeabilidade magnética μ_i com a temperatura, que por sua vez é determinado pelo comportamento da anisotropia magnetocristalina K_1 com a temperatura, que usualmente domina completamente o comportamento da saturação magnética com a temperatura. A constante de anisotropia K_1 fisicamente representa a resistência ou barreiras de energia que os dipolos magnéticos devem superar para deixar sua orientação inicial e se alinharem conforme a direção do campo externamente aplicado. Isso depende da simetria cristalina e das interações dos íons que ocupam os sítios do reticulado. Nas ferritas de MnZn a constante K_1 diminui com a temperatura até uma certa temperatura onde torna-se zero. Subsequentemente e a temperaturas mais altas alcança valores negativos que

fisicamente significam que o campo de anisotropia muda de direção. A temperatura onde K_1 torna-se zero coincide com a temperatura de máximo secundária da curva de permeabilidade magnética em função da temperatura e também com a temperatura onde as perdas exibem um mínimo.⁽¹⁻⁴⁾

Neste trabalho foram avaliados os parâmetros que controlam o efeito da temperatura nas perdas magnéticas das ferritas de MnZn.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Pós de ferrita de MnZn importados, produzidos pelo método cerâmico, foram compactados na forma de toróides e sinterizados controlando a temperatura e a atmosfera em forno tipo Batch, na IMAG. A matéria prima foi analisada em material sinterizado em MEV, utilizando o ferramental EDS de um microscópio eletrônico de varredura Philips XL-30 da Escola Politécnica da USP.

A temperatura do forno no patamar de sinterização foi 1290°C por 6h. As amostras foram colocadas dentro do forno em placas diferentes, e como existe uma variação de temperatura entre as mesmas, foi medida a temperatura em cada placa por meio do Anel de Controle de Temperatura de Processo (PTCR). Para esse anel cerâmico existe uma correlação entre diâmetro (ou seja, contração) e temperatura (anel Durst).

As medidas de perda magnética total (Pt) foram realizadas no IPT, utilizando o sistema de perdas constituído por um Wattímetro (Yokogawa PZ 4000), um amplificador de potência (Amplifier Research 40AD1) e um gerador de funções (HP 33120A). O Wattímetro mede os valores de potências, tensões e correntes elétricas existentes no circuito formado por uma fonte de alimentação (gerador de função e amplificador de potência), conectada ao dispositivo eletromagnético. No caso das ferritas as perdas magnéticas são obtidas pela medição da corrente no enrolamento primário e da tensão induzida no enrolamento secundário. O gerador de funções gera uma tensão senoidal alternada na faixa de frequência de operação das ferritas investigadas. Este gerador possui uma baixa potência de saída exigindo assim a utilização de um amplificador de potência para atingir os níveis de perdas medidos nos materiais magnéticos. Para ensaio em temperatura se incluí ao sistema um forno de temperatura controlada.

Estes ensaios foram realizados na faixa de 5.000 Hz – 100.000 Hz a partir de 25°C até 100°C, a 200mT.

A perda histerética foi obtida por extrapolação da curva de perdas/f (mJ/kg) vs. frequência (Hz) para uma frequência igual a zero.

Na Figura 1 mostra-se a relação entre a energia dissipada e a frequência. Uma relação linear foi encontrada para cada amostra, de acordo com a equação geral:

$$\text{Energia} = A + B \cdot f.$$

Onde A é a energia de histerese.

Os valores das perdas de excesso foram obtidos da diferença entre as perdas totais medidas e as perdas histeréticas calculadas pela extrapolação.

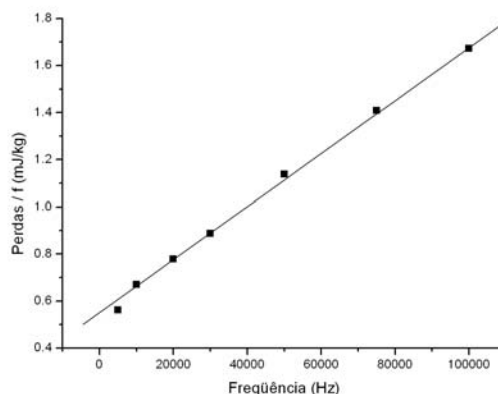


Figura 1. Energia dissipada por ciclo em função da frequência.

A densidade das amostras sinterizadas foi determinada pelo método hidrostático (princípio de Arquimedes).

Para a análise da microestrutura, as amostras foram lixadas com lixas grau 600 e 1000, e polidas usando pasta diamantada de 6 μm , 3 μm e 1 μm . Depois as amostras passaram por um acabamento num equipamento minimet com pasta diamantada de $\frac{1}{4}$ μm e com sílica coloidal (suspensão 0,06 μm) por 20 minutos e por mais 25 min apenas com sílica coloidal. Finalmente as amostras foram atacadas com HCl concentrado por 2 min. As micrografias óticas foram obtidas usando um microscópio Neophot 32. O tamanho de grão médio foi determinado pelo método do intercepto.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise química da ferrita de MnZn por MEV-EDS resultou na seguinte composição química: $\text{Mn}_{0,69}\text{Zn}_{0,23}\text{Fe}_{2,08}\text{O}_4$.

A tabela 1 mostra as dimensões das amostras sinterizadas e a Tabela 2 mostra os resultados de densidade e tamanho de grão.

Tabela 1. Dimensões das ferritas de MnZn sinterizadas.

Amostra	Diâmetro externo (mm)	Diâmetro interno (mm)	Espessura (mm)
A1	10,25	5,62	6,62
A2	10,36	5,70	6,70

Tabela 2. Temperatura (PTCR), densidade e tamanho de grão dos toróides de ferritas de MnZn

Amostra	Temperatura PTCR (°C)	Densidade (g/cm ³)	Tamanho de grão (μm)
A1	1374	4,75	9,50
A2	1298	4,60	7,00

A Figura 2 mostra a variação das perdas totais em função da frequência. Nota-se que as perdas aumentam com o aumento da frequência. As perdas totais consistem principalmente de perdas histeréticas. Sabe-se que as perdas histeréticas

umentam linearmente com o aumento da freqüência.

As perdas magnéticas por ciclo são diretamente proporcionais a freqüência entre 5kHz e 50kHz (Figura 3).

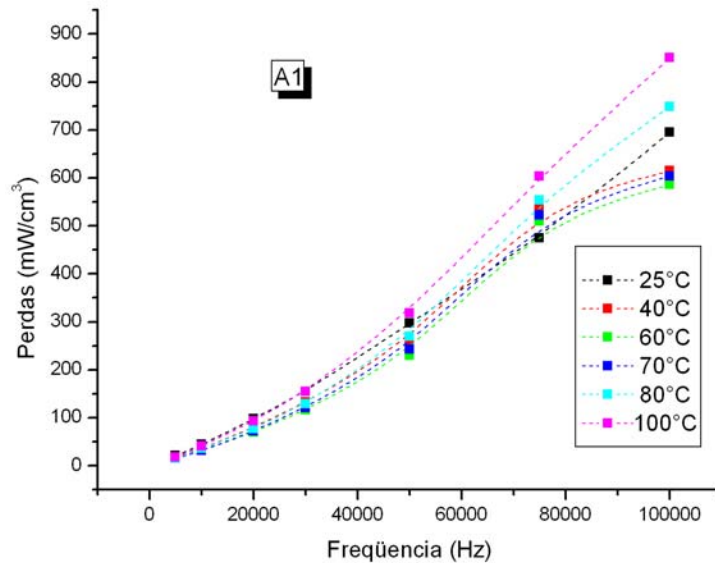


Figura 2. Comportamento das perdas magnéticas em função da freqüência para várias temperaturas na amostra A1.

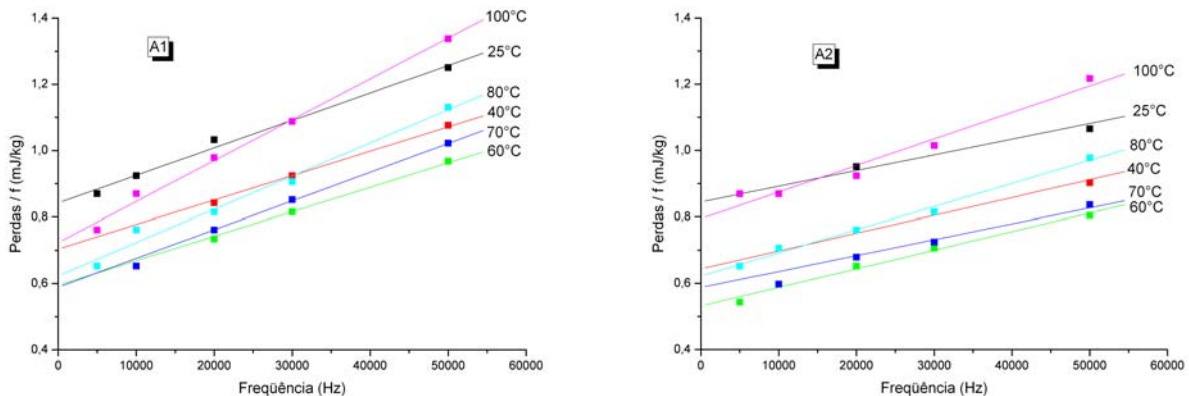


Figura 3. Relação entre as perdas magnéticas por ciclo (Perdas/f) e a freqüência.

A Tabela 2 e a Figura 4 mostram os valores obtidos das energias em relação a seu tamanho de grão e temperatura de sinterização. As perdas aumentam com o aumento do tamanho de grão. A maior temperatura de sinterização resultou num maior tamanho de grão (ver Figura 5). Ao compararmos as duas amostras (A1 e A2) na Figura 4, podemos observar que as perdas histeréticas são similares enquanto que as perdas totais e de excesso apresentam resultados significativamente diferentes entre as amostras. Tanto as perdas totais como as perdas histeréticas mostram uma temperatura de mínimo de 60°C, onde K_1 se torna zero.⁽¹⁻⁵⁾

Os resultados obtidos mostram que para a amostra A1 a contribuição da perda histerética somente é maior até 50°C e para a amostra A2 de 25°C até 70°C é maior e a 80°C a contribuição da perda histerética e de excesso praticamente são iguais, para logo a 100°C ser maior novamente. Segundo a literatura^(1,3,4) a baixas freqüências a perda total é devida principalmente à contribuição da perda histerética. A amostra A1 geralmente tem perdas maiores, mas nas perdas histeréticas a

amostra A2 apresenta um leve aumento a 80°C.

As perdas totais a 60°C diminuem em torno de 20% se o tamanho de grão for reduzido.

O aumento gradual da densidade com o aumento do tamanho de grão enquanto a resistividade elétrica diminui, está em conformidade com as características físicas que geralmente ocorrem nas ferritas de MnZn.⁽⁶⁾

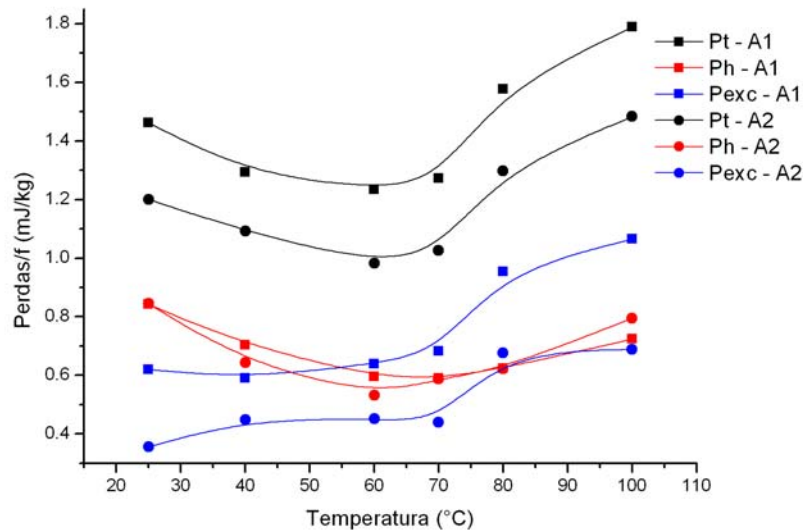


Figura 4. Comparação do efeito da temperatura de ensaio e da temperatura de sinterização na separação das perdas magnéticas por ciclo a 200mT.

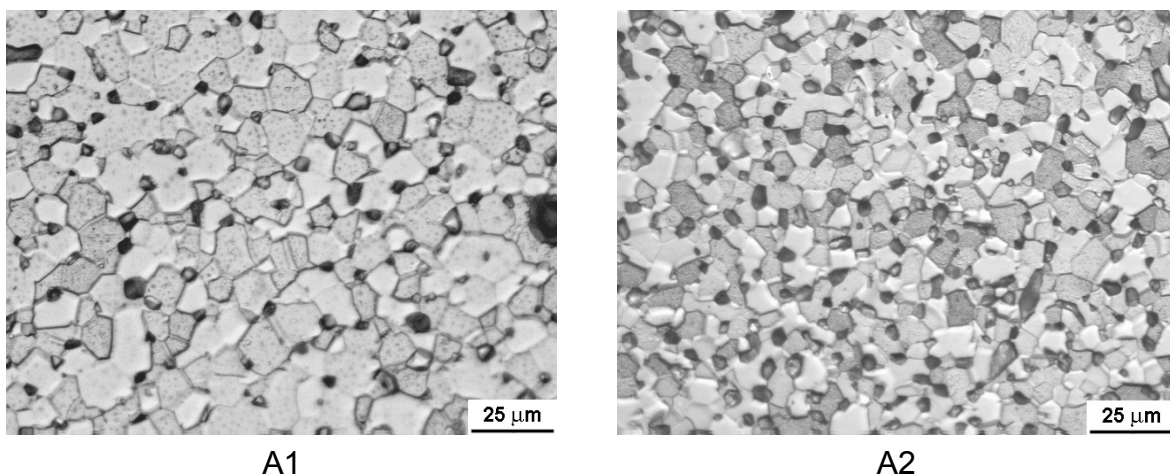


Figura 5. Efeito da temperatura de sinterização na microestrutura de amostras sinterizadas na mesma pressão parcial de oxigênio.

A Figura 5 mostra as microestruturas das amostras sinterizadas a diferentes temperaturas (PCTR). Foi obtida uma microestrutura homogênea com poros intergranulares relativamente grandes. Amostras sinterizadas a 1.374°C apresentaram um tamanho de grão médio de aproximadamente 9μm e amostras sinterizadas a 1.298°C, 7μm. O tamanho de grão das amostras sinterizadas à temperatura mais alta aumentou aproximadamente 35% ao ser comparado com as amostras sinterizadas a menor temperatura, e a densidade aumentou ao redor de 3%,

o que implica que o tamanho médio do poro aumento durante o crescimento do grão.

O tamanho de grão não deve ser reduzido abaixo de 5 μ m porque pode aumentar a forma anisotrópica até um ponto em que a permeabilidade é adversamente afetada.⁽¹⁾

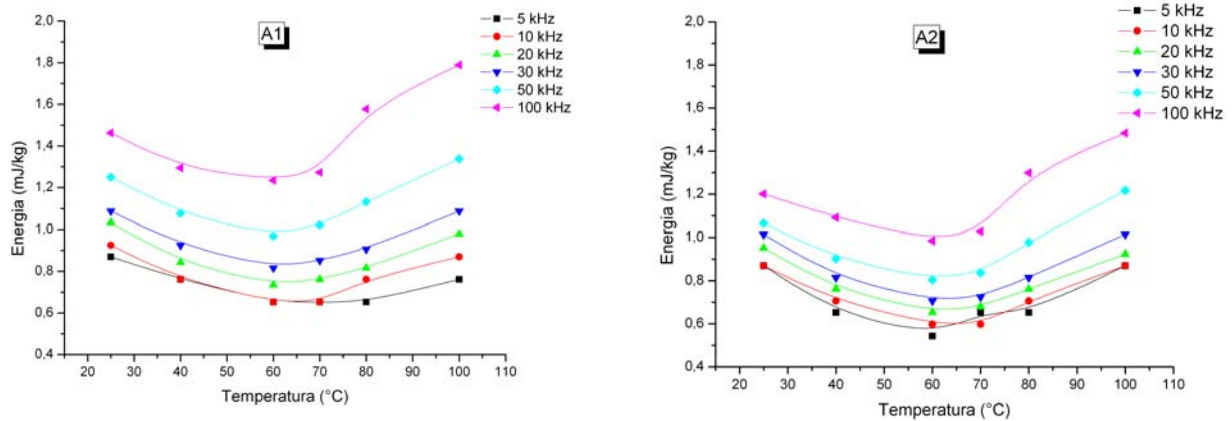


Figura 6. Efeito da temperatura de ensaio na energia dissipada por ciclo para amostras com diferentes temperaturas de sinterização a várias frequências.

A Figura 6 mostra a dependência das energias dissipadas a várias frequências. As energias dissipadas aumentam com o aumento da frequência. Também se observa que a temperatura de perda mínima (T_{min}) não muda para esse intervalo de frequências.

4 CONCLUSÃO

Conforme outros autores,⁽¹⁻⁴⁾ foi possível comprovar através deste trabalho que as perdas magnéticas em ferritas de MnZn apresentam um ponto de mínimo quando sujeitas a diferentes temperaturas. Isto se deve a diminuição da constante de anisotropia K_1 com o aumento da temperatura até um valor nulo, ponto em que a perda atinge seu valor mínimo. Para temperaturas acima deste ponto, a constante alcança valores negativos, o que fisicamente significam que o campo de anisotropia mudou de direção fazendo com que as perdas comecem a aumentar de valor.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro da CAPES e da FAPESP e o auxílio técnico da empresa IMAG.

REFERÊNCIAS

- 1 HENDRICKS, C. R.; AMARAKOON, V. W. R. Processing of manganese zinc ferrites for high-frequency switch-mode power supplies. *Ceramic Bulletin*, v.70, n.5, p.817-823, 1991.
- 2 INOUE, O.; MATSUTANI, N.; KUGIMIYA, K. Low loss MnZn-ferrites: Frequency dependence of minimum power loss temperature. *IEEE Transactions on Magnetics*, v.29, n.6, p.3532-3534, 1993.
- 3 SUH, J. J.; SONG, B; M.; HAN, Y. H. Temperature dependence of power loss of

- Mn-Zn ferrites at high frequency. IEEE Transactions on Magnetism, v.36, n.5, p.3402-3404, 2000.
- 4 ZASPALIS, V.; TSAKALOUDI, V.; PAPAZOGLU, E.; KOLENBRANDER, M.; GUENTHER, R.; VAN DERVALK, P. Development of a new MnZn-ferrite soft magnetic material for high temperature power applications. Journal of Electroceramics, v.13, p. 585-591, 2004.
 - 5 STOPPELS, D. Developments in soft magnetic power ferrites. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, n.160, p.323-328, 1996.
 - 6 JEONG, W. H., HAN, Y. H., SONG, B. M. Effects of grain size on the residual loss of Mn-Zn ferrites. Journal of Applied Physics, v. 91, p. 7619-7621, 2002.