

EFEITO DA MICROESTRUTURA NA CURVA DE HISTERESE DA PERDA ANÔMALA¹

Laura Spinelli Pinheiro Perassa²
Adriano Alex de Almeida³
Fernando José Gomes Landgraf⁴

Resumo

As perdas magnéticas nos aços elétricos são usualmente divididas em três parcelas: perda histerética, perda clássica e perda anômala. É aceito que a microestrutura tem efeitos na perda anômala. Foram estudados os efeitos do tamanho de grão e da textura. Foram usadas amostras de aço GNO com diferentes tamanhos de grão e amostras de aço GO laminadas nas direções transversal e longitudinal. Enquanto o efeito da textura foi claramente observado, mostrando que a perda anômala é mais simétrica e menos ruidosa na direção longitudinal, o efeito do tamanho de grão não pode ser bem definido; observa-se que existe um padrão no formato das curvas, mas não há conclusões sobre os efeitos desse fator na perda anômala.

Palavras-chave: Microestrutura; Perda anômala; Perda magnética.

THE EFFECT OF MICROSTRUCTURE ON THE HYSTERESIS CURVE OF THE ANOMALOUS LOSS

Abstract

In electrical steels, magnetic losses are usually divided into three portions: hysteresis loss, eddy current loss and anomalous loss. It is accepted that microstructure has effects upon the anomalous loss. The effects of grain size and texture were studied. We used samples of GNO steel with different grain sizes and samples of GO steel rolled on transverse and longitudinal directions. While the effect of texture could be clearly observed, showing that the anomalous loss is more symmetric and less noisy in the longitudinal direction, the effect of grain size could not be well defined; it can be seen that there is a pattern on the shape of the curves, but deeper conclusions about the effect of grain size on the anomalous loss could not be made.

Key words: Microstructure; Anomalous loss; Magnetic loss.

¹ *Contribuição técnica ao 68^o Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Aluna de Iniciação Científica, Depto. de Eng. Metalúrgica e de Materiais; Graduada em Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, USP, São Paulo, Brasil.*

³ *Engenheiro de materiais. Mestrando, Depto. de Eng. Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica, USP, São Paulo, Brasil.*

⁴ *Engenheiro metalúrgico. Diretor-presidente, Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT); Professor do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica, USP, São Paulo, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

A perda magnética é usualmente dividida em três parcelas: a perda histerética; a perda clássica ou parasita e a perda anômala.

A perda histerética pode ser determinada experimentalmente, medida em frequência quase estática. É aceito que ela é inversamente proporcional ao tamanho de grão, que depende linearmente da frequência e que é diretamente proporcional a indução magnética elevada a um certo expoente. Assim, podemos equacioná-la da seguinte maneira:

$$Ph = \left(c_1 + \frac{c_2}{T_g}\right) * B^k * f$$

Onde T_g é o tamanho de grão; B é a indução magnética; f é a frequência aplicada e c_1 , c_2 e k são constantes a serem determinadas experimentalmente.

A perda clássica foi formulada por Thomson⁽¹⁾ e é dada pela equação

$$P_{cl} = \frac{\pi^2 * e^2 * B^2 * f^2}{6\rho}$$

Onde e é a espessura da lâmina e ρ é a resistividade do material.

A perda anômala é calculada como a diferença entre a perda total e a soma das perdas histerética e clássica:

$$P_a = P_t - P_h - P_{cl}$$

Pelo modelo de Pry e Bean,⁽²⁾ a perda anômala, no caso específico dos aços de grão orientado pode ser dada como uma função da perda clássica:

$$P_a = (n-1) * P_{cl}, \text{ com } n = 1.63 * D/e$$

Onde e é a espessura da lâmina e D é a distância entre as paredes de domínio.

Matsumura e Fukuda⁽³⁾ propuseram que ela é proporcional à raiz quadrada do tamanho de grão e Shiozaki e Kurosaki,⁽⁴⁾ que o fator de proporcionalidade é $(-1/2)$.

Bertotti⁽⁵⁾ em 1988, usando um modelo de "objetos magnéticos" (MO), afirma que para um tamanho de grão menor que a espessura do material o próprio grão será o MO e a perda anômala será dada pela equação a seguir:

$$P_a = 8 (B * f)^{3/2} \sqrt{2 * \sigma * G * T_g^2 * \langle B_s \rangle * H_{hist}/B}$$

Onde $\sigma = 1/\rho$ é a condutividade do material e $G = 0.1356$.

H_{hist} pode ser relacionado com o inverso do tamanho de grão e, portanto, também nesse modelo a perda anômala é proporcional a raiz quadrada do tamanho de grão.

Bertotti ressalta que para grãos maiores que a espessura do material essa equação não se aplica, pois neste caso cada grão será constituído de vários MO e as hipóteses utilizadas não serão mais válidas.⁽⁵⁾

A influência do tamanho de grão nas perdas magnéticas pode ser observada pela presença desse fator nas equações da perda histerética e da perda anômala. O tamanho de grão ideal, ou seja, o tamanho de grão que minimiza as perdas magnéticas foi estudado por Campos, Teixeira e Landgraf.⁽⁶⁾

Campos determinou a relação entre a distância entre as paredes de domínio e o tamanho de grão. A soma da energia magnetostática e da energia da parede de domínio por unidade de volume apresenta em sua expressão tanto o fator D como o tamanho de grão:

$$E_t = \frac{\beta * D * \mu_0 * M_s^2}{T_g} + \frac{\gamma}{D}$$

Onde M_s é a magnetização de saturação e β é uma constante que depende da configuração da parede de domínio.⁽⁷⁾

Minimizando essa expressão, ou seja, derivando em relação a D e igualando a zero

$$(dE_t/dD=0) \text{ chega-se em: } D = \sqrt{\frac{\gamma * T_g}{\beta * \mu_0 * M_s^2}}$$

D é, portanto, proporcional à raiz quadrada do tamanho de grão. Além disso, foi determinado experimentalmente que D é proporcional ao inverso da raiz quadrada da frequência.

Usando essas relações e o modelo de Pry and Bean, Campos propôs a seguinte equação para a perda anômala:

$$P_a = \frac{c_3 * T_g^{1/2} * f^{3/2} * B^2 * e^2}{\rho}$$

A equação da perda total em função do tamanho de grão fica então:

$$P_t(T_g) = P_h + P_a = \left(c_1 + \frac{c_2}{T_g}\right) * B^k * f + \frac{c_3 * T_g^{1/2} * f^{3/2} * B^2 * e^2}{\rho}$$

Onde c_1 , c_2 , c_3 , k são constantes a serem determinadas experimentalmente. Para $B < 1,2T$, $k = 1,6$.⁽⁸⁾

Derivando a expressão da perda total em relação ao tamanho de grão e igualando a zero ($dP_t/dT_g = 0$), obtém-se a fórmula para o tamanho de grão ideal.

$$T_g = \left(\frac{C * \rho}{B^{2-k} e^2 f^{1/2}}\right)^{2/3}$$

Onde C é uma constante a ser determinada experimentalmente.

Essa relação é válida somente para aços de grão orientado.⁽⁶⁾

Essa Iniciação Científica tem como objetivo analisar o comportamento da curva de histerese da perda anômala mediante mudanças na microestrutura.

Neste trabalho serão apresentados os resultados parciais referentes aos efeitos do tamanho de grão e da textura.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o estudo do tamanho de grão, as amostras usadas eram de aço GNO (aços de grão não-orientado), com espessura 0,540 mm, densidade 7.780 Kg/m³ e resistividade 28 $\mu\Omega\text{cm}$. O tamanho de grão inicial era de 11 μm . Através do processo de tratamento térmico, foi realizado o crescimento do tamanho de grão para 58 μm e 62 μm . Após o tratamento térmico, as amostras foram recozidas de maneiras diferentes de acordo com o tamanho de grão: para $T_g=11 \mu\text{m}$, o recozimento foi feito a 600°C pelo período de 2 horas; para $T_g=58\mu\text{m}$, a 850°C por 4 horas; e para $T_g = 62 \mu\text{m}$, a 850°C por 8 horas.

Para o estudo da textura, foram usadas amostras de aço GO (aços de grão orientado) com as seguintes características: espessura 0,271 mm, densidade 7.650 Kg/m³, resistividade 49 $\mu\Omega\text{cm}$ e dimensões 300x30. As amostras foram divididas em dois conjuntos de acordo com a direção de laminação, longitudinal e transversal.

Em ambos os casos, foram feitas medidas magnéticas em um quadro de Epstein com indução de 1.5T e frequência de 60 Hz para a perda total e em regime quase estático (0,005 Hz) para a perda histerética.

Para realizar as medidas de indução e campo magnético, aplica-se uma corrente que aumenta continuamente até que o valor desejado para a indução magnética

seja atingido, nesse caso, até $B = 1.5T$. Os valores de H correspondentes a cada valor da indução são determinados pela fórmula $H = N_1 \cdot i / L$, onde N_1 é o número de espiras no enrolamento externo do quadro de Epstein, i é a corrente aplicada e L é o comprimento magnético efetivo do quadro.

Em seguida, foram geradas as curvas de histerese das perdas. O quadro de Epstein forneceu 720 pontos para a perda total e 400 pontos para a perda histerética. Esses pontos correspondiam a três ciclos de histerese para cada perda. Cada ciclo foi traçado separadamente e o menos ruidoso e mais simétrico foi escolhido para representar a perda correspondente. Esse procedimento foi aplicado tanto para a perda total como para a perda histerética.

A curva da perda parasita foi determinada a partir do equacionamento de Bertotti, Mazzetti e Soardo⁽⁹⁾ no qual a indução magnética em função do tempo é $B(t) =$

$$B_m \cdot \cos(2\pi ft), \text{ onde } B_m \text{ é a indução máxima e o campo clássico é } H_{cl}(t) = \frac{\sigma \cdot e^2}{12} \times \frac{dB}{dt}.$$

Foi feita, então, uma interpolação linear das curvas das perdas histerética e total em função da indução $B(t)$ obtida para determinação dos valores de campo magnético correspondentes a cada valor de indução. Obtidos os valores do campo magnético para a perda total e para a perda parasita, o campo da perda anômala foi calculado como a diferença entre o campo da perda total e a soma dos campos das perdas histerética e parasita, para cada valor de indução. Interpolou-se primeiramente 500 pontos, mas a curva da perda anômala apresentava muito ruído e tentou-se a interpolação com 200 pontos em busca da atenuação desse ruído. Como pode ser observado ao comparar as Figuras 1 e 2, houve uma diminuição do ruído (essa diminuição pode ser mais claramente observada para $|B| > 1,2T$ e, além disso, o traçado da curva está mais suave na Figura 1) e, portanto, decidiu-se pelo uso das curvas com 200 pontos.

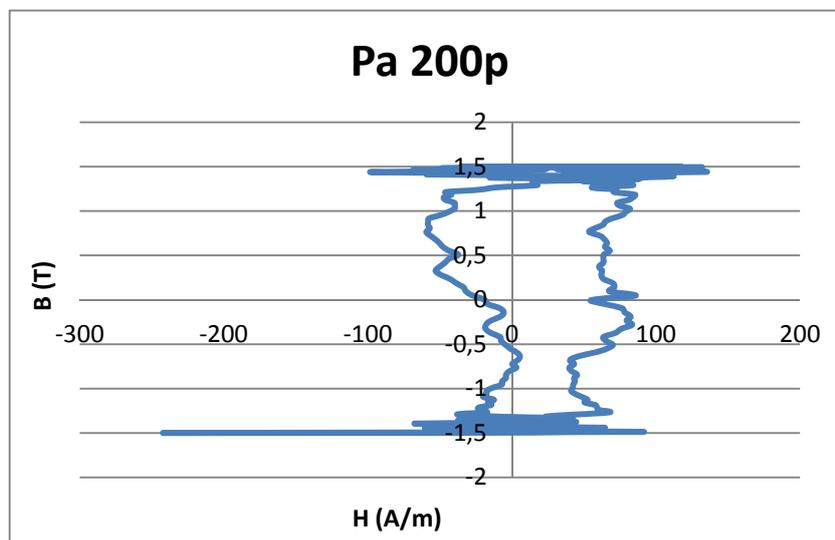


Figura 1. Perda anômala do aço GNO, direção transversal, interpolada com 200 pontos.

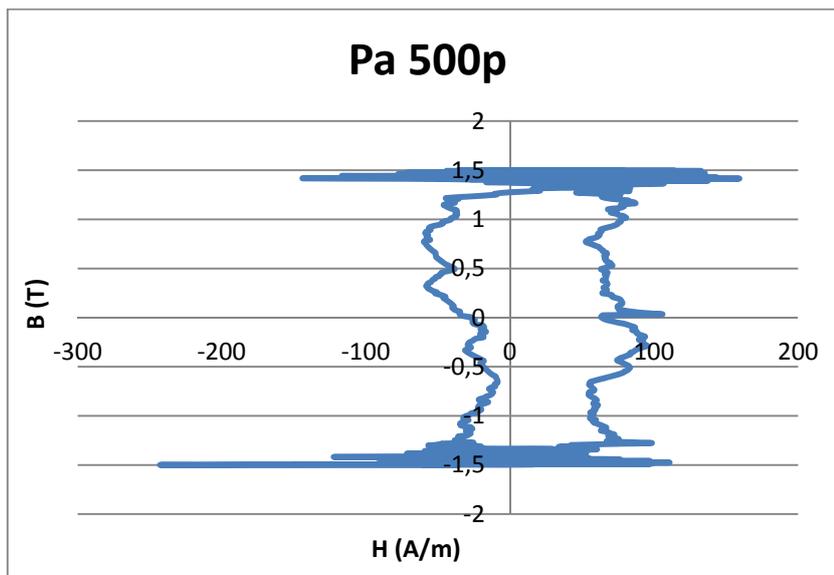


Figura 2. Perda anômala do aço GNO, direção transversal, interpolada com 500 pontos.

Finalmente, é possível fazer um diagrama com as curvas de histerese de todas as perdas (total, histerética, parasita e anômala) como pode ser visto na Figura 3.⁽¹⁰⁾ É importante ressaltar que a área da curva de histerese de uma determinada perda corresponde ao valor de tal perda e que a área é constante para qualquer número de pontos interpolados.

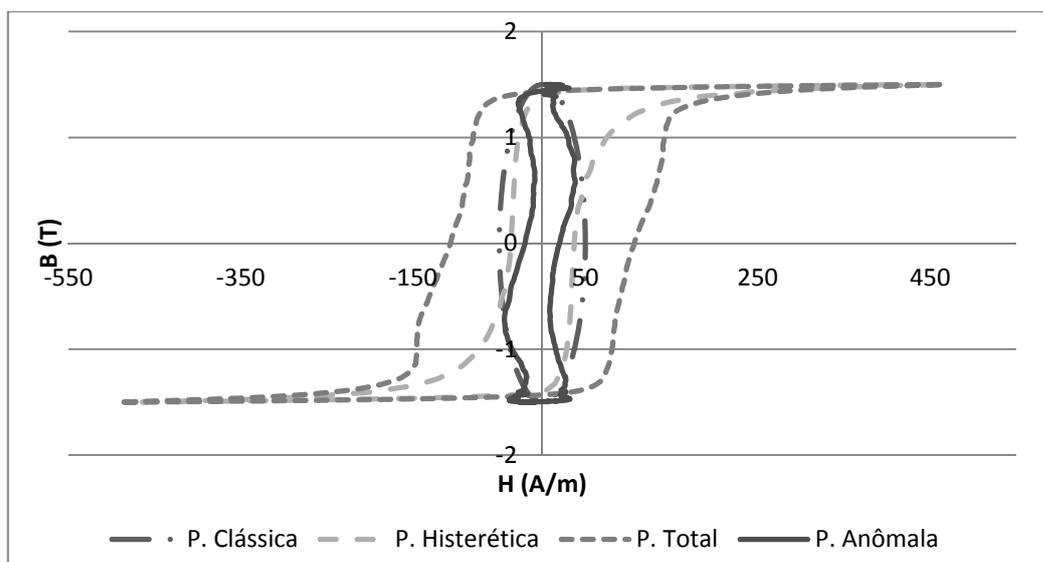


Figura 3. Perdas do aço GNO recozido a 850°C por 8 horas, T_g = 62 μm, medidas a 1,5 T e 60 Hz.

3 RESULTADOS

As Figuras 4 a 6 apresentam as curvas de histerese da perda anômala para os diferentes tamanhos de grãos estudados no aço GNO. As Figuras 7 e 8, por sua vez, apresentam a curva para as direções transversal e longitudinal do aço GO.

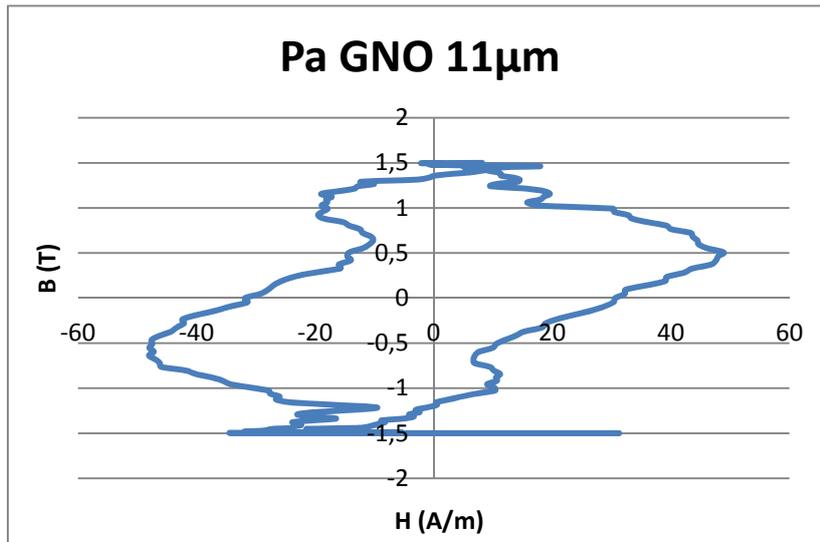


Figura 4. Perda anômala a 1,5T e 60 Hz para aço GNO recozido a 600°C por 2 h, com Tg = 11 µm.

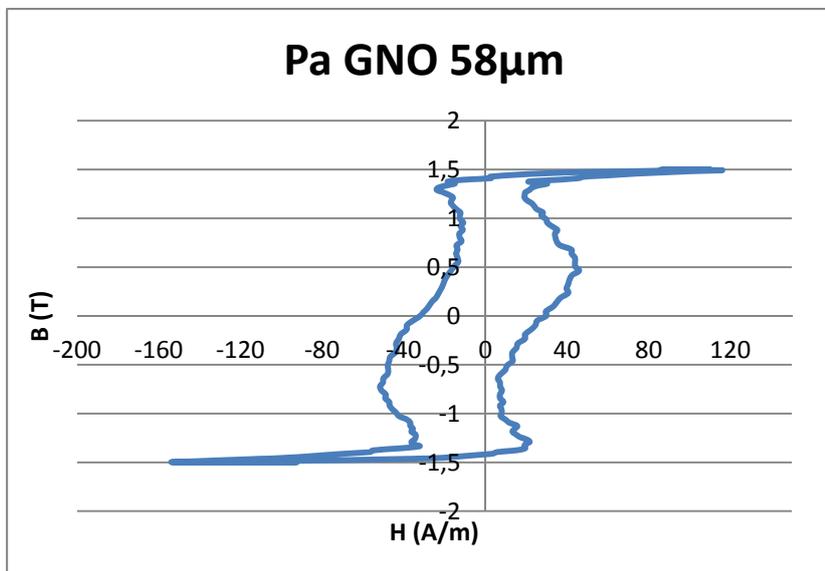


Figura 5. Perda anômala a 1,5T e 60 Hz para aço GNO recozido a 850°C por 4 h, com Tg = 58 µm.

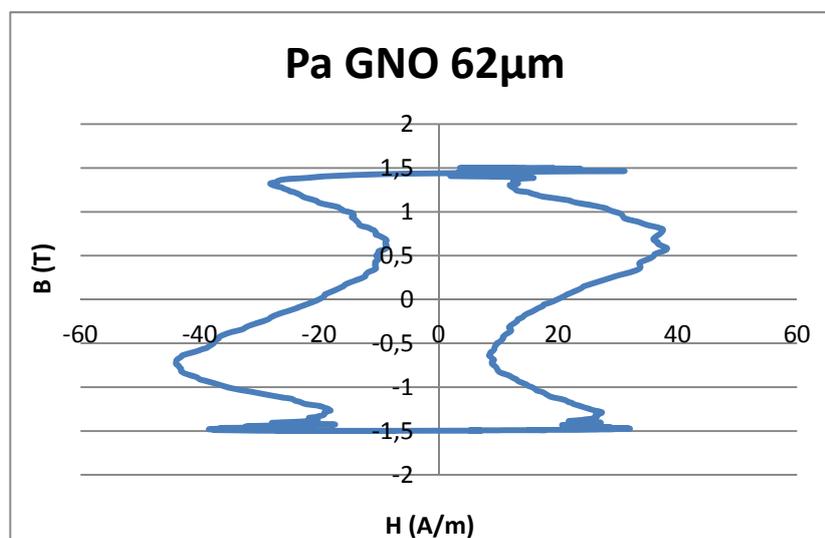


Figura 6. Perda anômala a 1,5T e 60 Hz para aço GNO recozido a 850°C por 8h, com Tg = 62 µm.

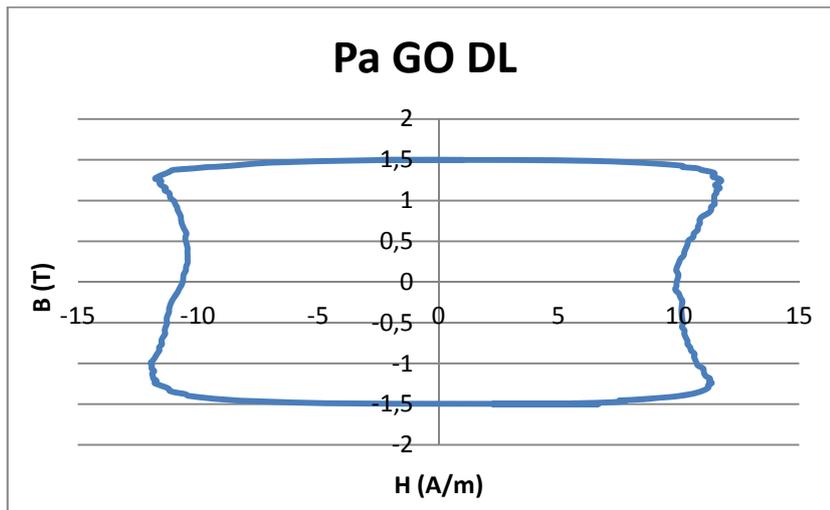


Figura 7. Perda anômala para aço GO na direção longitudinal, a 1.5T e 60 Hz.

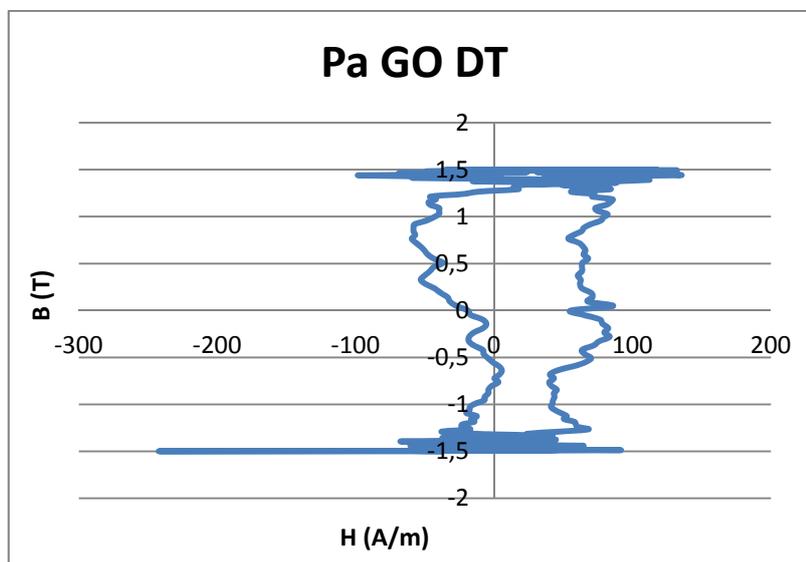


Figura 8. Perda anômala para aço GO na direção transversal, a 1.5T e 60 Hz.

4 DISCUSSÃO

Sobre o tamanho de grão, é possível fazer as seguintes observações acerca das curvas de histerese: existe um padrão no formato das curvas, apesar das diferenças entre elas; nenhuma das curvas apresenta uma simetria perfeita; os pontos de ruídos das curvas não se localizam nos mesmos lugares nem têm a mesma intensidade; para $T_g=58\mu\text{m}$, o valor máximo atingido pelo campo ($H = 120 \text{ A/m}$ para $B = 1.5 \text{ T}$ e $H = -160 \text{ A/m}$ para $B = -1.5 \text{ T}$) é bem superior ao atingido nas curvas de $T_g = 11 \mu\text{m}$ e $T_g = 68 \mu\text{m}$ (em módulo, aproximadamente, 50 A/m e 40 A/m , respectivamente).

Não é possível ainda, entretanto, afirmar qual tamanho de grão corresponde ao menor valor da perda anômala.

Já nos gráficos sobre a textura, as diferenças entre as duas curvas podem ser claramente observadas. Na direção transversal a curva de histerese da perda anômala é menos simétrica e muito mais ruidosa do que na direção longitudinal, principalmente quando $|B| > 1\text{T}$. Nota-se também que o campo magnético atinge valores muito maiores na direção transversal do que na direção longitudinal.

5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados apresentados e das análises propostas, pode-se afirmar que existe uma influência tanto do tamanho de grão como da textura (no caso, observada pela direção de laminação) na curva de histerese da perda anômala.

Enquanto o efeito da textura aparece bem claro, indicando que a perda anômala é menor na direção longitudinal para os aços GO, o efeito do tamanho de grão não está bem definido. Ainda são necessários mais estudos para descobrir qual o tamanho de grão, dentre os analisados, correspondente a uma menor perda anômala e se isto está de acordo com a equação proposta para o tamanho de grão ideal apresentada anteriormente.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CNPq pelo auxílio financeiro e ao IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas) pelo auxílio na parte experimental.

REFERÊNCIAS

- 1 THOMSON, J.J. On the heat produced by eddy currents in an iron plate exposed to an alternating magnetic field, *Electrician*, v. 28, 1892
- 2 PRY, R. H.; BEAN, C. P. Calculation of the energy loss in magnetic sheet materials using a domain model, *J. App. Phys.*, v. 29, 1958
- 3 MATSUMURA, K.; FUKUDA, B. Recent developments of non-oriented electrical steel sheets, *IEEE Trans. Magn.*, v. MAG-20, 1984.
- 4 SHIOZAKI, M.; KUROSAKI, Y. The effects of grain size on the magnetic properties of nonoriented electrical steel sheets, *J. Materials Engineering*, v. II, 1989
- 5 BERTOTTI, G. General properties of power losses in soft ferromagnetic materials, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 24, 1988
- 6 CAMPOS, M.F.; TEIXEIRA, J.C.; LANDGRAF, F.J.G. The optimum grain size for minimizing energy losses in iron, *J. Magnetism and Magnetic Materials*, 2005
- 7 SHILLING, J.W.; HOUZE, G.L. Magnetic properties and domain structure in grain-oriented 3% SiFe, *IEEE Trans. Magn.*, v. MAG-10, 1974
- 8 STEINMETZ, C.P. *Trans. AIEE*, 1892
- 9 BERTOTTI, G.; MAZZETTI, P.; SOARDO, G.P. A general model of losses in soft magnetic materials, *J. Magnetism and Magnetic Materials*, v. 26, 1982
- 10 ALMEIDA, A.A.; LANDGRAF, F.J.G.; RODRIGUES-JR, D.L. não publicado.