

PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DE AÇOS ELÉTRICOS DE GRÃO NÃO-ORIENTADO

F. Bohn^a, A. Gündel^a, A. M. Severino^a, F. J. G. Landgraf^b, R. L. Sommer^a
Departamento de Física, Universidade Federal de Santa Maria, 97105-900
Santa Maria - RS - Brasil
felipebohn@mail.ufsm.br

^a Departamento de Física, Universidade Federal de Santa Maria, 97105-900
Santa Maria - RS - Brasil

^b Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - SP - Brasil

RESUMO

Os aços elétricos de grão não-orientado (GNO) são utilizados em aplicações que exigem isotropia das propriedades magnéticas ao longo do plano da chapa. O emprego dos aços GNO é muito amplo, se destacando o uso em motores elétricos de pequeno e grande porte, reatores de lâmpadas e medidores de energia. O estudo das propriedades magnéticas e dos processos de magnetização dos aços GNO é de grande interesse, pois estão relacionados com as perdas magnéticas e, conseqüentemente, ao consumo de energia elétrica. Particularmente, o estudo do ruído Barkhausen (BN) e da magnetostricção é importante, pois ambos dependem tanto da estrutura magnética como da estrutura metalúrgica dos materiais e fornecem informações complementares sobre os processos de magnetização e de perdas ao longo da curva de histerese. O BN corresponde aos pulsos de tensão induzidos em uma bobina sensora que envolve um material ferromagnético, quando este é magnetizado. Sua origem está ligada à existência de domínios magnéticos e de paredes de domínios no interior do material. A magnetostricção, por sua vez, corresponde à variação das dimensões do material quando este é submetido a um campo magnético, sendo sensível ao movimento de paredes de domínio de 90° e à rotação da magnetização. Uma conseqüência do efeito magnetostrictivo é o ruído sonoro produzido por um transformador em operação. Este vem da contração cíclica do núcleo dos transformadores, que possui um alto valor da constante de magnetostricção. Nos materiais ferromagnéticos, as perdas magnéticas podem ser separadas em componentes de baixa indução, geralmente relacionada aos movimentos de paredes de domínios magnéticos, e de alta indução, normalmente associada à rotação da magnetização. Observa-se experimentalmente que a componente de perdas em alta indução, que não é explicada nos modelos apenas considerando-se a rotação, representa aproximadamente 50% das perdas totais dos aços GNO. Deste modo, o estudo do BN e da magnetostricção pode auxiliar a esclarecer o complexo processo de perdas nos aços elétricos GNO na região de alta indução. Neste trabalho, são apresentados resultados obtidos em amostras de aços de FeSi_{3,2%} produzidas pela ACESITA. Os resultados mostram que o BN ocorre em quase todas as partes do ciclo de histerese e sua origem na região de alta indução pode estar associada ao movimento de paredes de 90° e à nucleação de novos domínios magnéticos. Medidas de magnetostricção também são apresentadas e correlacionadas às medidas de BN.

Palavras chaves: aços elétricos, propriedades magnéticas, perdas magnéticas, processos de magnetização.

INTRODUÇÃO

Os aços elétricos são materiais magneticamente macios utilizados em inúmeras aplicações, tais como equipamentos para geração e utilização de energia elétrica. Estes aços não conduzem corrente elétrica, mas sim fluxo magnético, que circula no interior do material. Os aços elétricos de grão não-orientado (GNO), ou seja, que não apresentam uma textura pronunciada, são utilizados em aplicações que exigem isotropia das propriedades magnéticas ao longo do plano da chapa. O emprego destes aços é muito amplo, se destacando o uso em motores elétricos de pequeno e grande porte, reatores de lâmpadas e medidores de energia.

Embora os equipamentos elétricos possuam uma alta eficiência, as perdas totais que ocorrem representam desperdício de energia. As perdas magnéticas representam uma parte importante das perdas totais. Sendo assim, o estudo das propriedades magnéticas e dos processos de magnetização dos aços GNO é de grande interesse, pois estão relacionados com as perdas magnéticas e, conseqüentemente, com o consumo de energia elétrica numa escala global.

Os aços elétricos estudados neste trabalho são aços ao silício. A adição do silício ao ferro altera as propriedades elétricas, magnéticas e mecânicas do aço: aumenta sua resistividade elétrica e diminuiu a anisotropia. Isto é de grande interesse, pois, como estes materiais são utilizados em equipamentos em que um campo magnético variável é aplicado em várias direções, com o aumento da resistividade elétrica, as correntes de Foucault geradas pela variação com campo magnético no tempo diminuem, e com a diminuição da anisotropia, o campo magnético pode ser aplicado em qualquer direção sem ocorrerem grandes diferenças entre as direções. Porém, a adição do silício diminui a indução do material, ou seja, o material satura em um menor valor, além de deixar o material quebradiço, tornando-se um problema para atividades que exigem a laminação do material.

REVISÃO TEÓRICA

Materiais ferromagnéticos

Os materiais ferromagnéticos caracterizam-se por exibirem a magnetização de saturação $M_s(T)$ dependente da temperatura. Um ferromagneto torna-se espontaneamente magnetizado abaixo de certa temperatura crítica, chamada de temperatura de Curie (T_C). A fase ferromagnética é caracterizada pelo alinhamento dos momentos magnéticos dos átomos constituintes do material. Os ferromagnetos são compostos por materiais puros como Fe, Ni e Co, e suas ligas (Cullity, 1952, Chikazumi, 1964).

Os materiais ferromagnéticos tendem a minimizar a energia magnética, que é dada principalmente pela soma das energias magnetoelástica, magnetocristalina, de troca e magnetostática. Como resultado dessa minimização, tem-se a distribuição da magnetização em

pequenas regiões chamadas de domínios magnéticos, onde cada domínio possui a magnetização de saturação M_s . Entretanto, as direções da magnetização dentro de cada domínio estão distribuídas de tal maneira que o material como um todo tem magnetização nula. Os processos de magnetização convertem um material de um estado de muitos domínios para um estado de único domínio na direção de um campo magnético aplicado externo. A sua distribuição é diferente para cada amostra e é chamada de estrutura de domínios magnéticos. Os domínios magnéticos são separados por zonas de transição chamadas de paredes de domínios, onde a magnetização afasta-se da orientação da magnetização do domínio e, gradualmente, aproxima-se da orientação da magnetização do domínio adjacente. As paredes de domínio podem ser descritas pelos ângulos entre os vetores M_s dos domínios do qual a parede separa. Elas podem ser classificadas em paredes de 180° e paredes de não- 180° .

Processos de magnetização

Quando uma amostra ferromagnética inicialmente desmagnetizada é submetida a um campo magnético externo com intensidade crescente, sua magnetização, medida na direção do campo, irá aumentar até alcançar um valor de saturação, a partir do qual um aumento no campo externo não produz qualquer variação significativa da magnetização. A partir do estado inicial, ao ser aplicado um campo externo é verificado que, se o campo não ultrapassar algum limite, que depende da amostra em particular, ocorrem variações reversíveis na magnetização, caracterizando a região I da figura 1. Nesta região, o processo de magnetização ocorre, em grande escala, por deslocamentos reversíveis das paredes de domínios bem como, em menor intensidade, por rotações, também reversíveis, da magnetização. Para campos maiores, o processo de magnetização se torna irreversível e predominam os movimentos irreversíveis de parede de domínio e rotações irreversíveis da magnetização. Esta região II é a chamada região de magnetização irreversível. Se o campo aplicado for posteriormente aumentado (região III da figura), predominantemente teremos rotação da magnetização, o que define a região de aproximação da saturação. A partir deste ponto, o material entra na região de saturação técnica onde o aumento do campo produzirá variações muito pequenas da magnetização. Ao ser diminuindo o valor do campo aplicado, a partir da saturação, a magnetização retorna ao valor de remanência M_r . Invertendo o sentido do campo e aumentando sua intensidade, a magnetização continua a diminuir de valor a partir de M_r , passando por zero em um campo chamado de campo coercivo H_c , e, finalmente, atingindo o seu valor de saturação na direção oposta à original para campos suficientemente altos. Diminuindo-se a intensidade do campo a zero a partir deste ponto, a magnetização atinge a remanência negativa. Aumentando-se o campo no sentido positivo a magnetização passa por zero, em $+H_c$, e atinge o valor de saturação na direção de saturação original, fechando o ciclo completo de histerese.

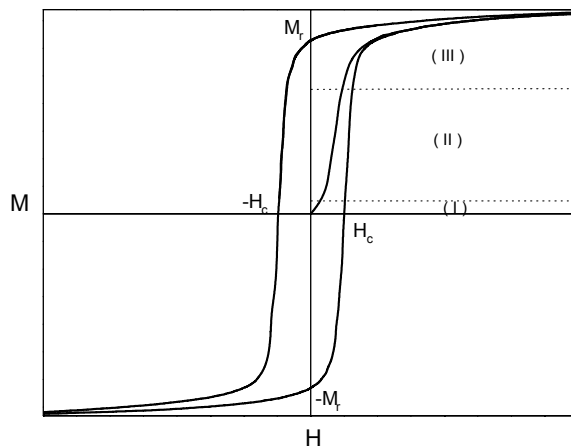


Figura 1: Ciclo de histerese de um material ferromagnético e os processos de magnetização.

Perdas magnéticas

As perdas magnéticas podem ser separadas em três parcelas: perdas histeréticas, perdas parasíticas clássicas (devido as correntes de Foucault) e as perdas anômalas (ou em excesso) (Werner, 1992, Moses, 1990, Landgraf et al., 1998). As perdas parasíticas podem ser reduzidas através do uso de altos teores de silício, tornando o aço economicamente caro. As perdas histeréticas, por sua vez, são muito sensíveis a microestrutura dos aços, beneficiando-se do aumento do tamanho de grão, redução dos teores de elementos formadores de inclusões não metálicas tais como os sulfetos, nitretos e óxidos e da melhoria da orientação dos cristais dentro da chapa. Outras características microestruturais dos aços, tais como densidade de discordâncias e distribuição de tamanho de inclusões e precipitados também contribui para as perdas. As perdas anômalas são dadas pela diferença entre as perdas totais e as perdas histeréticas e parasíticas clássicas. Os mecanismos que as geram ainda são objetos de estudo.

O valor das perdas magnéticas também depende das características eletromagnéticas da medida, como indução máxima e frequência de excitação, de características físicas da amostra, tais como espessura e direção de corte da amostra em relação à direção de laminação.

A perda magnética é o critério mais importante dos aços elétricos. Seu valor das perdas pode ser determinado através do cálculo da área do interior da curva de histerese, com H em A/m e B em T, resultando na energia dissipada por ciclo em unidades de J/m^3 . Quando a histerese é determinada na condição quase estática, a área da histerese é menor do que aquela determinada em frequências mais altas.

A energia dissipada na condição quase estática está associada às mudanças bruscas da magnetização. Isto se deve ao fato de que, abaixo do "joelho" da curva, predominam os movimentos irreversíveis das paredes de domínios. Uma parede presa a um defeito não se move, apesar do aumento do campo H, enquanto não atingir um campo crítico necessário para vencer aquela barreira. Atingindo o campo crítico, a parede se move rápida e irreversivelmente, dando origem aos saltos Barkhausen, que serão abordados mais adiante.

Na região de alta indução, o ramo descendente da curva de histerese, entre a indução máxima e a remanência, não volta exatamente sobre o ramo ascendente, caracterizando a dissipação de energia. A rotação de domínios que ocorre acima do “joelho” da curva é predominantemente reversível, logo sem dissipação de energia. Portanto, a dissipação de energia nesta região pode ser devida a uma parcela de rotação irreversível dos domínios magnéticos ou devido à movimentação de paredes de domínios durante a aniquilação de domínios no ramo ascendente, ou ainda na nucleação de domínios no ramo descendente.

Na busca de estudar os mecanismos que influenciam nas perdas, Landgraf et al. (Landgraf et al., 1999) sugerem que as perdas histeréticas podem ser separadas em duas componentes: perdas em baixa indução (para $B < B[\mu_{\max}] \sim 0.8 \text{ T}$), geralmente relacionada aos movimentos das paredes de domínios de 90° e 180° ; e perdas em alta indução ($B > B[\mu_{\max}]$), que por vezes são indevidamente associadas apenas à rotação da magnetização. A figura 2 apresenta uma curva de indução mostrando as duas regiões de induções propostas.

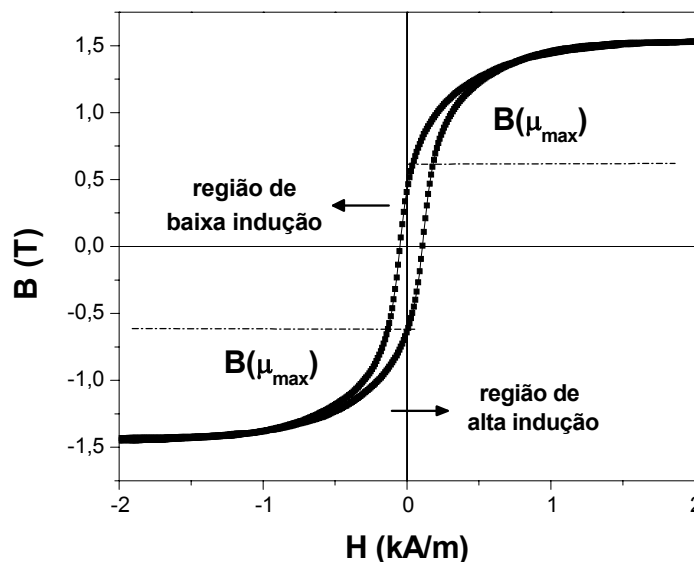


Figura 2: Curva de indução mostrando a separação das perdas em regiões de baixa e alta indução.

Entretanto, tal processo não pode explicar o fato de que 50% das perdas totais são perdas de alta indução (Landgraf et al., 1999). Apesar destes fatos, somente poucos trabalhos que tratam do ruído Barkhausen e sua correlação com as perdas em aços elétricos de grão não-orientado podem ser encontrados na literatura (Hartmann et al., 2003, Gündel et al., 2004). Compreender os mecanismos de magnetização nesta faixa de induções é o primeiro passo em direção à otimização dos processos de magnetização dos materiais e a consequente redução das perdas.

Ruído Barkhausen

O ruído Barkhausen consiste em séries de pulsos de tensão que são detectados nas extremidades de uma bobina sensora enrolada ao redor de uma amostra de material ferromagnético submetido a um campo aplicado variável. O ruído é induzido por variações abruptas na magnetização

do material, chamados de saltos Barkhausen, geradas principalmente pelo aprisionamento e subsequente desaprisionamento das paredes de domínios magnéticos durante seu movimento devido aos defeitos, impurezas ou tensões localizadas no material (Bertotti, 1998). A figura 3 apresenta uma curva de indução mostrando um detalhe da curva onde aparece o ruído Barkhausen detectado por uma espira envolvendo o material.

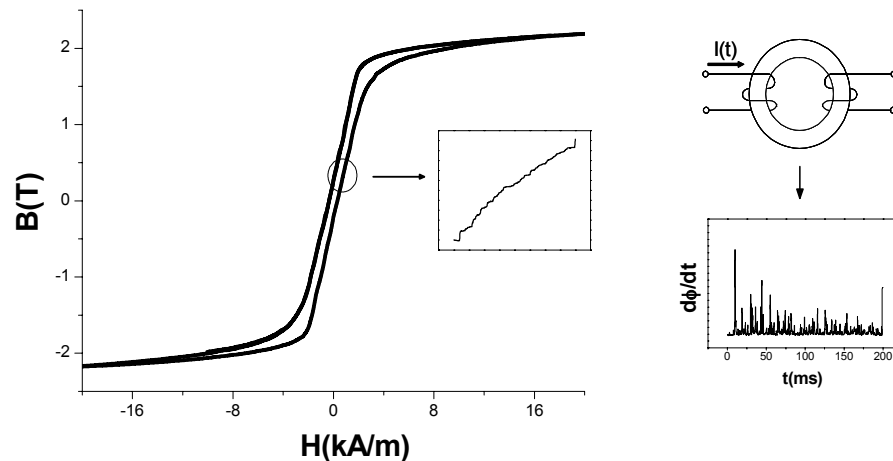


Figura 3: Curva de indução e o ruído Barkhausen detectado por uma bobina sensora.

O estudo do ruído Barkhausen produz informações úteis sobre a dinâmica da magnetização e sua correlação com os parâmetros macroscópicos medidos na curva de histerese do material. Em particular, é possível acompanhar a evolução da estrutura de domínios do material e até mesmo a nucleação e aniquilação de novas famílias de domínios. A conexão do ruído Barkhausen com as perdas magnéticas (histeréticas + clássicas + anômalas) nos aços elétricos foi realizada com êxito por G. Bertotti e colaboradores (Bertotti et al., 1981, Alessandro et al., 1988). Devido à complexidade intrínseca do sistema de paredes de domínios magnéticos, o fenômeno apresenta características estocásticas as quais tornam sua análise complexa.

No caso dos aços elétricos, o estudo do ruído Barkhausen é útil como uma ferramenta na investigação dos mecanismos de perda ao longo da curva de histerese, e em particular, dos processos de magnetização nos níveis de alta indução.

Magnetostricção

O fenômeno magnetoelástico que chamamos de magnetostricção descreve genericamente a variação das dimensões dos materiais ferromagnéticos quando são sujeitos a campos magnéticos externos. O efeito magnetostrictivo mais conhecido é o ruído de um transformador em operação. Esse ruído vem da contração cíclica do núcleo dos transformadores que possuem um alto valor de magnetostricção. O valor da magnetostricção corresponde à mudança fracional de uma dimensão, e é dada simplesmente por:

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l} \quad (1)$$

O valor da magnetostricção depende do tipo de parede de domínios existentes no material. Como o alongamento espontâneo é independente do sentido de magnetização, a dimensão do domínio não muda quando a direção da sua magnetização espontânea é revertida. Sendo que a passagem de uma parede de 180° através de certa região reverte à magnetização da região, pode-se concluir que movimento de paredes de 180° não produz qualquer mudança magnetostrictiva na dimensão.

Por outro lado, movimentos de paredes de 90° sempre são acompanhados por uma mudança na dimensão da amostra. A rotação da magnetização M_S de um domínio sempre produz uma mudança dimensional, pois a magnetostricção espontânea depende da direção do vetor M_S . Assim, no caso geral, considerando um cristal magnetizado em um eixo difícil, o processo de magnetização envolverá movimento de paredes de 180° , 90° e rotação da magnetização. Os últimos dois destes processos vêm acompanhados pela magnetostricção (Cullity, 1952).

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

As amostras estudadas foram produzidas pela empresa ACESITA e são compostas por $FeSi_{3,2\%}$. A espessura das chapas estudadas é de 0.5 mm. Apesar de serem amostras de grão não-orientado, medidas de textura exibem uma componente (110) [001]. As amostras foram cortadas em direções que formam ângulos intermediários em relação à direção de rolamento, definida durante o processo de fabricação.

O ruído Barkhausen foi estudado em amostras cortadas na direção de rolamento (chamada amostra 0°) com as seguintes dimensões: 30 mm comprimento \times 1 mm largura. O ruído foi medido em um circuito magnético aberto. Neste caso, a amostra é inserida no interior de um solenóide com compensação nas extremidades. As amostras foram excitadas por um campo senoidal de 200mHz.

O sinal do ruído Barkhausen foi detectado por meio de uma pequena bobina, de aproximadamente 80 espiras, enrolada ao redor da parte central da amostra. O sinal foi amplificado por um pré-amplificador Stanford (modelo SR560) e o sinal digitalizado por uma placa digitalizadora com resolução de 12 bits (ComputerBoards modelo AD PCI-DAS8040/12). O processamento digital do sinal foi realizado com um programa desenvolvido na plataforma Agilent Vee. Para aumentar a relação sinal-ruído, o gerador de funções, a fonte de corrente e o pré-amplificador foram alimentados por baterias de 12 V.

A magnetostricção foi estudada em amostras com as seguintes dimensões: 30 mm comprimento \times 3 mm largura. As medidas foram feitas usando a técnica dos extensômetros ("strain gauges"), que são resistores cuja resistência varia com sua deformação e são colados no material a ser estudado. Após a preparação da amostra, que inclui lixar sua superfície, o extensômetro é colado à amostra com adesivo a base de Epóxi e é colocado em um forno durante 2 horas sob temperatura de $150^\circ C$. O sinal da variação da resistência do extensômetro, proporcional a deformação do material, foi medida por meio de uma ponte de Wheatstone, conectada a um amplificador lock-in (Stanford SR830). O campo magnético foi gerado por um eletroímã e medido por uma sonda Hall. Um programa desenvolvido na plataforma Agilent Vee controla e monitora o experimento.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A figura 4 mostra uma curva de indução típica dos aços elétricos GNO estudados. A curva foi obtida pelo método fluxométrico em circuito fechado numa frequência de excitação de 200 mHz. A indução de saturação das amostras, como pode ser visto na curva, é de 1.5 T.

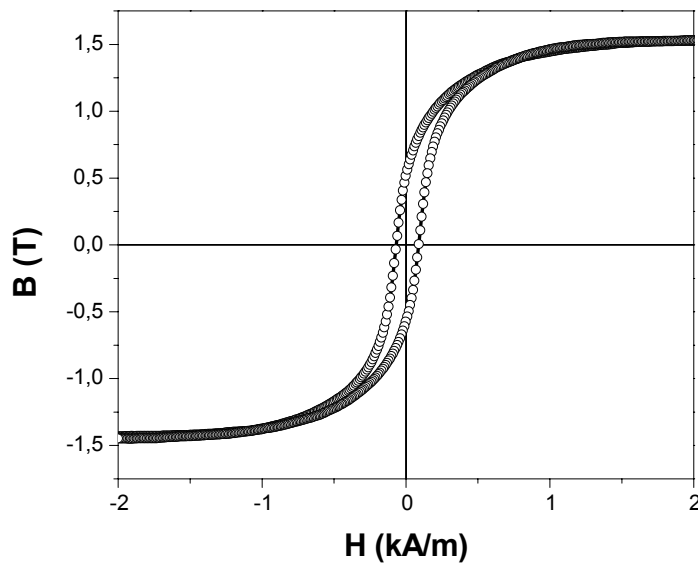


Figura 4: Curva de indução medida a frequência de 200 mHz.

Ruído Barkhausen

A figura 5 apresenta a variação do fluxo magnético ($d\phi/dt$) detectado pela bobina sensora ao excitar a amostra com um campo senoidal com frequência de 0.2 Hz. Esta curva corresponde a meio ciclo da curva de histerese mostrado na figura anterior. Observa-se uma grande quantidade de eventos Barkhausen nesta curva. No intuito de quantificar a intensidade do BN, calculamos o valor médio quadrático da voltagem (V_{RMS}), que é dado pela expressão:

$$V_{rms}(\alpha) = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_i^\alpha)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

Nesta expressão, N é o número total de pontos por amostragem e α é índice de identificação da amostragem.

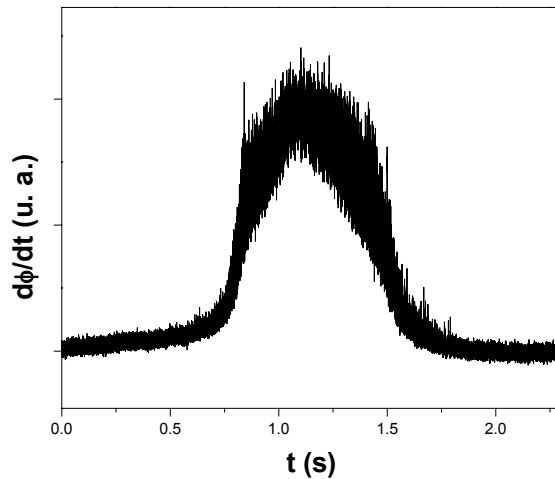


Figura 5: Série temporal de ruído Barkhausen obtida em uma amostra de aço elétrico GNO com frequência de excitação de 200 mHz.

Pode ser observado na figura 6 que o ruído Barkhausen está presente em quase todas as regiões da curva de histerese, incluindo a região de alta indução. O valor máximo de V_{RMS} foi obtido em $-1,2$ T, onde, partindo do valor de indução de $-1,5$ T, ocorre o primeiro surto de eventos, associado possivelmente à nucleação de novos domínios magnéticos. Abaixo do joelho da curva de magnetização ($\sim 0,8$ T), o movimento das paredes de domínios é o principal processo de magnetização, enquanto acima do joelho a rotação da magnetização predomina. Com isto, após $-1,2$ T, o número de eventos diminui tornando a crescer em $1,2$ T, ao qual se pode associar à aniquilação de domínios magnéticos. É aceitável que a rotação reversível da magnetização não gere perdas [Sommer, 1990]. Por este motivo, o ruído Barkhausen observado pode estar relacionado com o movimento de paredes de domínios de 90° e, possivelmente, com a nucleação de novas estruturas de domínios em altos níveis de indução. Resultados semelhantes foram obtidos em amostras de aços texturizadas [Sommer, 1990].

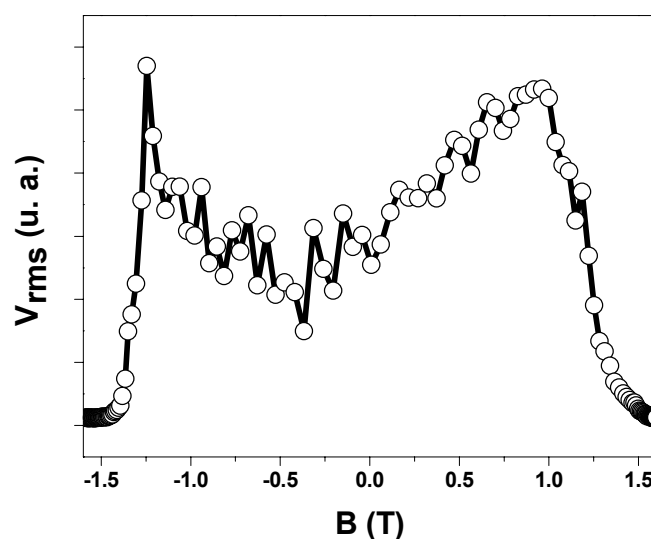


Figura 6: valor médio quadrático da tensão (V_{RMS}) do ruído Barkhausen em função da indução.

Magnetostricção

Na figura 7 estão mostrados os resultados obtidos a partir das medidas de magnetostricção. Observa-se que, quando o campo magnético é aplicado ao longo de um eixo fácil da amostra (amostra de 0°), ocorre predominantemente, em baixo campo e pequena magnetização, movimentos de paredes de domínios de 180° , fazendo com que as dimensões não variem. Porém, com o aumento do campo e, conseqüentemente, da magnetização, ocorre o movimento de paredes de 90° fazendo com que haja um aumento na dimensão. Como não há diminuição da magnetostricção na região de alta indução, o processo predominante é o movimento das paredes de domínios, ocorrendo pouca mudança da magnetização devido à rotação, caracterizando um eixo fácil.

Porém, quando o campo magnético é aplicado ao longo de um eixo intermediário (amostra de 50°) em relação à direção de laminação, o material primeiramente se expande nesta direção e após se contrai. Isto pode ser entendido imaginando que, em resposta ao campo aplicado, movimento de paredes de 90° e 180° ocorrem até que somente existam domínios nas direções dos eixos fáceis da amostra. Com o aumento do campo, ocorre rotação da magnetização na direção do campo aplicado e contração do material.

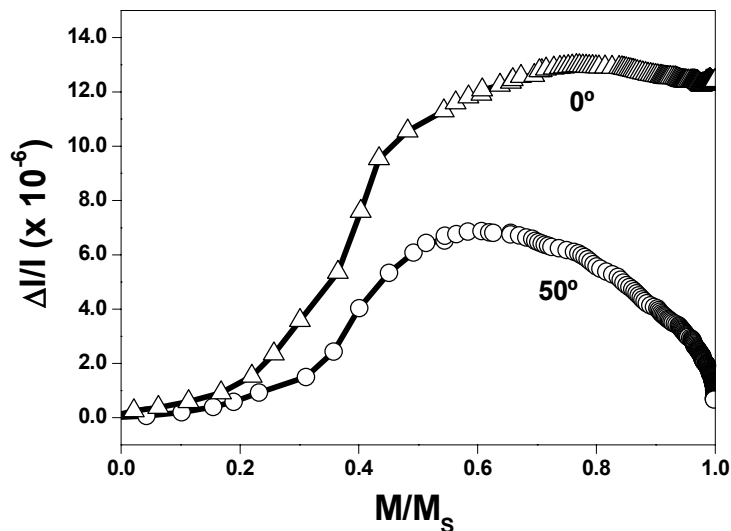


Figura 7: Curvas de magnetostricção em função da magnetização.

No caso do campo magnético ser aplicado ao longo de um eixo duro da amostra, cujo resultado não está apresentado aqui, movimentos de paredes de 180° ocorrem até que a amostra contenha domínios na direção dos eixos fáceis. Durante este processo, as dimensões não variam. Com o aumento do campo, ocorre rotação da magnetização na direção do eixo duro e esta rotação causa contração ou magnetostricção negativa nesta direção.

CONCLUSÕES

Através do estudo das medidas de ruído Barkhausen, observado na região de baixa e alta indução, nesta última com grande intensidade, tem-se que a dissipação de energia, na região de alta indução, pode estar relacionada com movimentos irreversíveis das paredes de domínios e com nucleação de novas e diferentes estruturas de domínios no ramo ascendente e ainda na nucleação de domínios no ramo descendente.

As medidas de magnetostricção mostram que, para amostras cortadas na direção de laminação, ocorre predominantemente em baixo campo e baixa magnetização, movimentos de paredes de domínios de 180° . Convém lembrar que a magnetostricção não é afetada por movimentos destas paredes na direção de aplicação do campo magnético. Porém, com o aumento do campo, há um simples aumento na sua dimensão, caracterizando o predomínio de movimento de paredes de domínios de 90° na região de alta indução. Porém, para a amostra de 50° , ocorre primeiramente a expansão e em seguida a contração do material, podendo ser entendido como, em resposta ao campo aplicado, o movimento de paredes de 90° e 180° que ocorre até que somente existam domínios nas direções dos eixos fáceis da amostra e com o aumento do campo, ocorre rotação da magnetização na direção do campo aplicado e conseqüente contração do material.

A correlação entre os resultados obtidos por ruído Barkhausen e magnetostricção, nos permite concluir que, na região de alta indução, uma parcela das perdas magnéticas é devida aos movimentos irreversíveis das paredes de domínios de 90° , observado através dos picos do valor RMS do ruído Barkhausen e do aumento da magnetostricção. Parte das perdas pode ser originada do movimento das paredes de domínios durante a formação e/ou aniquilação de novas e diferentes estruturas de domínios durante o processo de magnetização [Alessandro, 1988].

AGRADECIMENTOS

Esse trabalho foi parcialmente financiado por: CAPES, CNPq, FAPERGS, CT-ENERG/CNPq/FINEP.

REFERÊNCIAS

- 1 Alessandro, B; Beatrice, C.; Bertotti, G.; Montorsi, A. Phenomenology and interpretation of the Barkhausen effect in ferromagnetic materials. **Journal of Applied Physics**, v. 64, p. 5355, 1988.
- 2 Bertotti, G.; Fiorillo, F.; Sassi, M. P. Barkhausen noise and domain structure dynamics in Si-Fe at different points of the magnetization curves. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 23, p. 136-148, 1981.
- 3 Bertotti, G. **Hysteresis in Magnetism: For Physicist, Materials Scientists and Engineers**, Academic Press, USA, 1998.
- 4 Chikazumi, S. **Physics of Magnetism**, J. Wiley, USA, 1964.
- 5 Cullity, B. D. **Introduction to Magnetic Materials**, Addison-Wesley, USA, 1972.

- 6 Gündel, A.; Severino; A. M.; Landgraf; F. J. G.; Sommer, R.L. Barkhausen noise and high induction losses in non-oriented electrical steel. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 272-276, p. E561-E562, 2004.
- 7 Hartmann, K.; Moses, A. J. ; Meydan, T. A system for measurement of AC Barkhausen noise in electrical steels. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 254-255, p. 318-320, 2003.
- 8 Landgraf, F. J. G.; Emura, M.; Teixeira, J. C.; de Campos, M. F. Separação dos componentes de perdas magnéticas em aços totalmente processados. **Anais do 53º Congresso da ABM**, CDROM, p. 1542-1551, 1998.
- 9 Landgraf, F. J. G.; Teixeira, J. C.; Emura, M.; de Campos, M. F.; Muranaka, C. S. Separating components of the hysteresis loss of non-oriented electrical steels. **Materials Science Forum**, v. 302-303, p. 440-445, 1999.
- 10 Moses, A. J. Electrical steels: past, present and future developments. **IEEE Proceedings**, v. 137, n. 5, p. 233-245, 1990.
- 11 Sommer, R. L.;Livi, F. P. Barkhausen noise measurements in small (110)[001] Silicon-Iron samples. **Physica Status Solidi A**, v. 120, p. 609-615, 1990.
- 12 Werner, F. E. Energy-efficient steels for motor laminations. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v.1, p. 227-234, 1992.

MAGNETIC PROPERTIES OF NON-ORIENTED ELECTRICAL STEELS

ABSTRACT

Non-oriented electrical steels (NO) are used in applications that demand isotropy of magnetic properties along the plane of the sheet. The use of NO is very broad, stand out the use in small and large-scale electric engines, reactors and energy meter. The study of magnetic properties and magnetization process of NO electrical steels is very important because they are related to magnetic losses and, consequent, to the electric energy consumption. Particularly, the study of Barkhausen noise (BN) and magnetostriction is important, therefore both depend on the magnetic and metallurgical structure of the material and supply complementary information on the magnetization process and losses in the hysteresis loop. BN correspond to voltage pulses induced in a sensor coil that involves a ferromagnetic material while it is magnetized. Its origin is connected to the existence of magnetic domains and domain walls and their interactions with the metallurgical defects presents in the material. Magnetostriction, on the other hand, corresponds to the change of dimensions of the material while it is submitted to a magnetic field, being sensible to 90° wall motion and magnetization rotation. A consequence of the magnetostrictive effect is the noise produced by transformers in operation. It comes from the cyclic contraction of the nucleus of transformer that has a high value of the constant of magnetostriction. In ferromagnetic materials, magnetic losses can be separated in low induction component, usually, related to magnetic domains walls motion and high induction, normally associated to magnetization rotation. Experimentally, observe that the high induction losses component that is not explained in models that consider the rotation represents approximately 50% of

total losses of GNO steels. In this way, the study of BN and magnetostriction can assist to explain the complex losses process in GNO electrical steels in high induction region. In this work, obtained results of FeSi_{3.2%} steels samples produced by ACESITA are presented. These results show that BN occur in almost parts of hysteresis cycle and its origin in high induction region can be related to 90° walls motion and nucleation or annihilation of magnetic domains. Measures of magnetostriction also are presented and related to measures of BN.

Keywords: electrical steels, magnetic properties, magnetic losses, and magnetization process.