

EFEITO DA DEFORMAÇÃO PLÁSTICA SOBRE AS PERDAS DE EXCESSO EM AÇOS ELÉTRICOS DE GRÃO NÃO ORIENTADO¹

Daniel Luiz Rodrigues Junio²
João Ricardo Filipini da Silveira³
Gunther Johannes Lewczuk Gerhardt⁴
Frank Patick Missel⁴
Fernando José Gomes Landgraf⁵
Rogério Machado⁶
Marcos Flávio de Campos⁷

Resumo

Este trabalho avalia o efeito da deformação plástica sobre a perda de excesso em aço elétrico de grão não orientado. O material sob estudo foi extraído de uma bobina de aço recozido. As chapas extraídas foram laminadas a frio para a produção de amostras com deformação real entre 2% e 29%. A densidade de discordâncias desses corpos de prova foi estimada através de difração de raios X. A análise das propriedades magnéticas se deu através da medição de ruído de Barkhausen e análise dos ciclos de histerese para diferentes valores de indução máxima e frequência de excitação. Os resultados mostram que com a deformação as perdas de excesso tornam-se negligenciáveis. Este comportamento pode ser explicado se for assumido que com a deformação plástica eleva-se o número de paredes de domínio por unidade de volume, diminuindo assim as perdas de excesso. O aumento da área dos picos de Barkhausen com a deformação reproduz resultados obtidos em amostras com diferente teor de silício.

Palavras-chave: Deformação plástica; Densidade de discordâncias; Perdas de excesso; Ruído de Barkhausen.

EFFECT OF PLASTIC DEFORMATION ON THE EXCESS LOSS OF ELECTRICAL STEEL

Abstract

This work evaluates the effect of plastic deformation on the excess loss in non-oriented electrical steel strips. The starting material was taken from a single coil of annealed steel. Strips were extracted and cold rolled in order to produce samples with true strain ranging from 2% to 29%. X-ray diffraction was used to estimate the dislocation density. The analysis of magnetic properties was performed by Barkhausen noise measurements and also by analyzing the hysteresis loops obtained from Epstein frame measurements for different inductions and frequencies. These results allowed us to observe that the due to plastic strain the excess loss decreases to become negligible. This behavior can be explained if it is assumed that the plastic deformation lead to an increase in the number of domain walls per unit volume, thereby decreasing the excess loss. Barkhausen peak area increases with plastic deformation, reproducing results taken from samples of different silicon content.

Key words: Plastic deformation; Dislocation density; Excess loss; Barkhausen noise.

¹ Contribuição técnica ao 67^o Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Mestre em Eng. de Metalúrgica e de Materiais, Depto. de Eng. Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica (Poli), Universidade São Paulo (USP), Brasil.

³ Mestre em Eng. Metalúrgica e de Materiais, Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), SP, Brasil.

⁴ Doutor, Professor Depto. de Física e Química, Universidade Federal de Caxias do Sul, Brasil.

⁵ Doutor em Eng. de Metalúrgica, Depto. de Eng. Metalúrgica e de Materiais, Poli, USP e IPT, Brasil.

⁶ Doutor, Professor Depto. de Física, Universidade Federal de Sergipe, Brasil.

⁷ Doutor em Eng. Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal Fluminense, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O aço elétrico é a principal matéria-prima usada na construção de máquinas elétricas e dispositivos para a geração de potência. Nos dias de hoje a principal motivação para o desenvolvimento desses materiais é a necessidade de redução do consumo de energia. A eficiência energética desses materiais é afetada por características microestruturais.⁽¹⁾ Dentre esses fatores a deformação plástica, ainda que em pequena quantidade, é bem conhecida por elevar a dissipação de energia.⁽²⁾ Dessa maneira, este artigo discute o efeito da deformação plástica sobre a densidade de discordâncias (estimada através de difração de raios X) e propriedades magnéticas (perdas magnéticas e ruído de Barkhausen) em amostras de aço elétrico de grão não orientado.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a condução desse trabalho o material sob estudo foi extraído de uma única bobina de aço elétrico de grão não orientado cuja composição é dada pela Tabela 1. As chapas foram entregues na condição recozida (sem laminação de encruamento) com espessura 0,68 mm, tamanho de grão 18 μm , densidade 7.781 kg/m³ e 27,62 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ de resistividade elétrica.

Tabela 1. Composição química do material sob estudo

C	Mn	P	S	Si	Al	Cu	Cr	Ni	Mo	Ti
0.001	0.524	0.0374	0.0075	0.819	0.215	0.008	0.016	0.005	0.0011	0.0025

Visando a produção de conjuntos de amostras com diferentes quantidades de deformação a laminação a frio foi empregada. A deformação plástica fornecida foi quantificada de acordo com o cálculo da deformação real (DF) descrito na Equação 1.

$$DF = \ln\left(\frac{e_i}{e_f}\right) \times 100 \quad (1)$$

Onde e_i corresponde à espessura do material como recebido e e_f à espessura das chapas após laminação. Dessa maneira, chapas laminadas foram produzidas e agrupadas de acordo com a deformação real.

Os ensaios de difração de raios X foram executados em um difratômetro Shimadzu 6000. Assumiu-se que os picos observados seguiam uma distribuição Lorentziana e através de um *software* foi adotado um procedimento para a eliminação das contribuições vindas de $\text{CuK}\alpha_2$.

Medidas magnéticas foram feitas em quadro de Epstein usando oito chapas para cada conjunto de amostras. A aplicação do campo magnético se deu paralela à direção de laminação das chapas. A dissipação de energia foi calculada a partir dos ciclos de histerese e corresponde a área compreendida por essas curvas. A determinação das perdas totais foi executada através de um wattímetro para indução máxima de 1,0T e frequências entre 25 Hz e 175 Hz. A medição de perdas histeréticas se deu em regime quase estático (0,005 Hz) para induções máximas entre 0,4 T e 1,6 T.

Um conhecido procedimento de separação de perdas foi usado para analisar os resultados obtidos no quadro de Epstein. O valor da chamada perda parasita

“clássica” foi determinado a partir da Equação 2 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

$$P_c = \frac{(\pi \times f \times B_{\max} \times e)^2}{6 \times \rho \times d} \quad (2)$$

Onde f é a frequência, e a espessura, ρ a resistividade e B_{\max} é a indução máxima. As perdas de excesso correspondem à diferença entre a perda total e a soma das perdas parasitas clássicas e histeréticas.⁽³⁾

Para as medidas de ruído de Barkhausen, amostras de dimensões 3 cm x 30 cm foram montadas em um sistema que consiste em um longo solenóide submetido a um campo magnético externo que varia de forma sinusoidal com frequência igual a 2 Hz. Uma bobina de captação com 300 espiras de fio de cobre foi enrolada ao redor da amostra, cujo fator desmagnetizante foi estimado como próximo a 0,0006. Outra bobina idêntica (porém sem a amostra) foi conectada para executar o cancelamento do sinal em razão do campo do solenóide. O sinal foi filtrado (5 kHz – 100 kHz) e amplificado, após isso os dados de ruído foram coletados a 500.000 amostras por segundo e armazenados para análise posterior.⁽⁴⁾

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 mostra o efeito da deformação plástica sobre a espessura à meia altura (aqui designada pela sigla FWHM – *Full Width at Half Maximum*) dos picos de difração. Esses resultados foram usados para estimar a densidade de discordância das amostras usando o modelo descrito por Campos et al.,⁽⁵⁾ que é baseado na equação de Stibitz. Esses resultados são dados na Tabela 2. A densidade de discordâncias está relacionada à macro-tensões residuais. Em estudos anteriores,⁽⁵⁾ a macro-tensão residual observada em aços laminados após *skin-pass* foi pequena (inferior à 100 MPa).

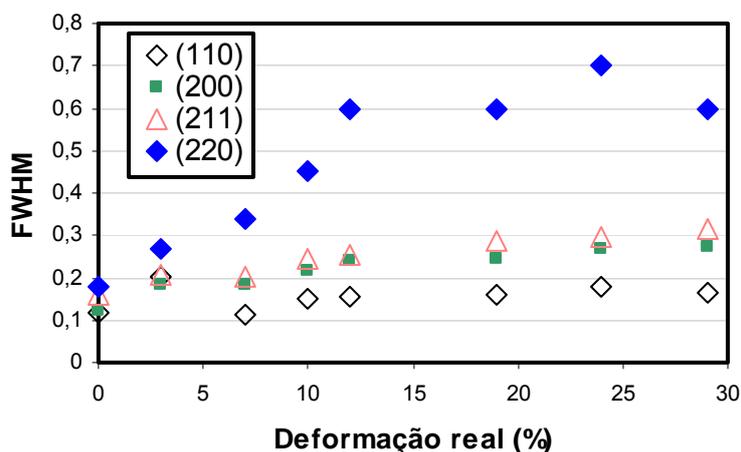


Figura 1. Espessura à meia altura dos picos de difração em função da deformação real.

Nota-se que a densidade de discordâncias aumenta com a deformação indicando a geração desses defeitos. No entanto, para pequenas deformações, entre 0% e 3% o aumento dessa densidade é mais intenso e a partir de 12% o incremento é mínimo. Após aproximadamente 10% de deformação ocorre a formação de células de discordâncias. A equação de Stibitz falha ao detectar a formação dessas estruturas. Em outras palavras, essa equação reflete as discordâncias distribuídas aleatoriamente ao longo da rede cristalina cuja densidade pouco aumenta a partir de

10% de deformação. Os dados também indicam a diferença entre a densidade de discordâncias observada para a mostra com deformação real 0% e o valor descrito na literatura (10^{12} m/m³, aproximadamente) para amostra de ferro recozido.⁽⁶⁾ Tal fato pode ser atribuído à hipótese da existência de alguma deformação plástica inerente ao processo de corte das amostras.⁽⁷⁾

Tabela 2. Espessura final, densidade de discordâncias (estimada por difração de raios X) e deformação real das amostras laminadas a frio

Espessura após laminação a frio (mm)	0,681	0,663	0,635	0,617	0,601	0,561	0,536	0,510
Deformação real (%)	0	3	7	10	12	19	24	29
Densidade de discordâncias (1/m²)	6,7E+13	1,2E+14	2,1E+14	2,3E+14	3,2E+14	3,8E+14	3,7E+14	4,1E+14

As medidas em quadro de Epstein mostraram um aumento da perda total em função da deformação para qualquer frequência analisada. Trabalhos anteriores relatam o aumento da perda histerética com a deformação plástica.⁽⁸⁾ Comportamento similar é observado aqui para todos os valores de indução máxima. Os dados experimentais apresentam bom ajuste à relação onde as perdas histeréticas são proporcionais à raiz quadrada da deformação real (Figura 2 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

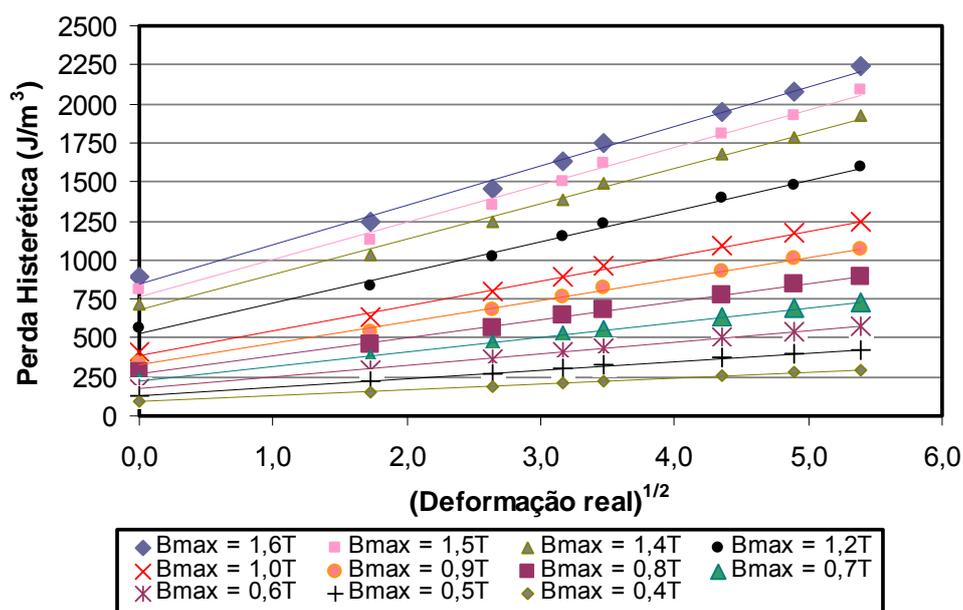


Figura 2. Perda histerética em função da raiz quadrada da deformação real para diferentes valores de indução máxima.

As perdas parasitas clássicas observadas diminuem com a redução da espessura seguindo a Equação 2. Alterações na resistividade elétrica em razão da deformação plástica são desprezíveis. Todos os conjuntos de amostras exibiram um crescimento linear das perdas totais com o aumento da frequência. No entanto os dados correspondentes ao material não laminado têm maior inclinação conforme relata a Figura 3. Este fato indica o efeito relativo da frequência se torna menor com o aumento da deformação.

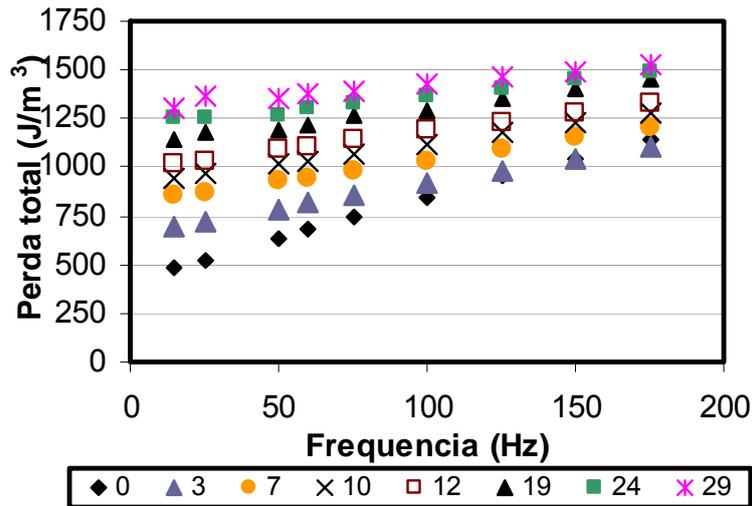


Figura 3. Evolução das perdas totais com o aumento da frequência para amostras com diferentes quantidades de deformação.

Examinando a dependência das perdas de excesso com relação à frequência (Figura 4), nota-se que essa parcela da perda aumenta com potência 0,82 para a amostra não deformada. A conhecida equação para a perda anômala (Equação 3), onde c é uma constante experimentalmente observada e l é o tamanho de grão, prevê que a perda de excesso de materiais não deformados varie com a raiz quadrada da frequência e com a raiz quadrada do tamanho de grão. Para as amostras plasticamente deformadas, a Figura 4 mostra que as perdas de excesso diminuem para valores desprezíveis (os pequenos valores negativos observados na Figura 4 estão dentro do erro experimental de aproximadamente 20 J/m^3).

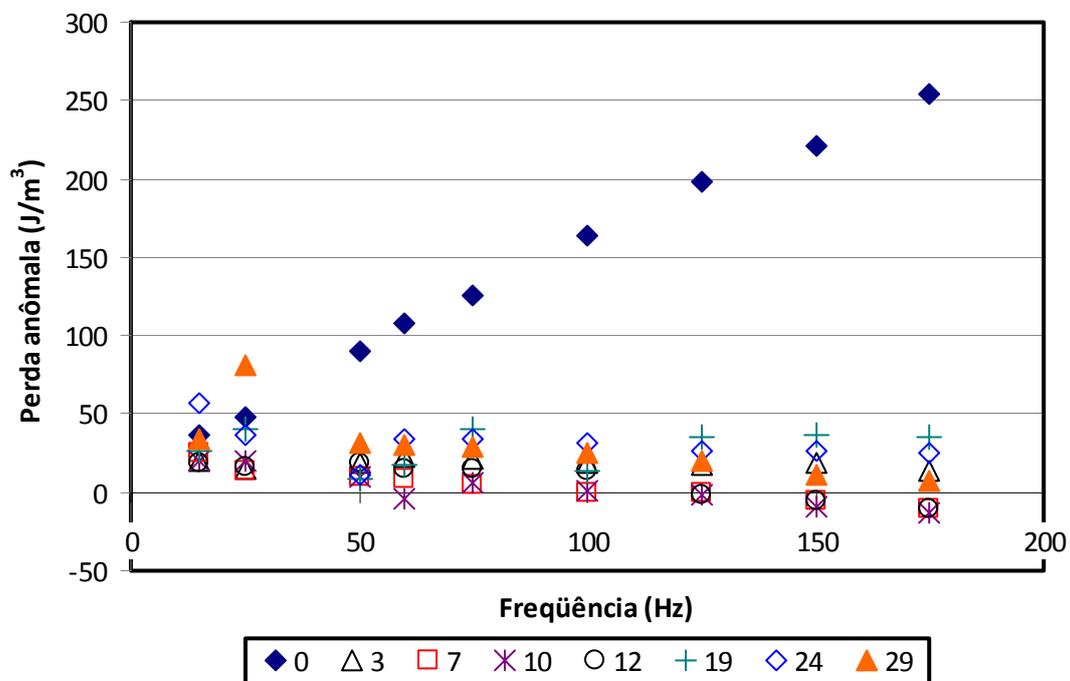


Figura 4. Evolução das perdas de excesso em função da frequência para amostras com diferentes quantidades de deformação.

$$W_e = c \cdot \ell^{1/2} \cdot \frac{1}{\rho} \cdot e^2 \cdot B_{\max}^2 \cdot f^{1/2} \quad (3)$$

É possível explicar o comportamento das amostras deformadas assumindo a hipótese de que o processo de deformação provoca uma fragmentação dos grãos⁽⁹⁾ o que deve diminuir as perdas de excesso de acordo com a Equação 3.⁽¹⁰⁾ **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Reduzindo o tamanho de grão, a distância entre paredes de domínios é reduzida,⁽¹⁰⁾ e isso diminui as perdas de excesso.

É possível estimar, indiretamente, o tamanho de grão (ou, mais precisamente o tamanho de célula) das amostras deformadas a partir dos seus valores de perdas histeréticas mostrados na Figura 2, levando em conta a correlação entre perdas histeréticas e tamanho de grão. A Equação 4 proposta em Rodrigues Junior, Silveira e Landgraf⁽¹¹⁾ descreve as perdas histeréticas em função do tamanho de grão (ℓ) e da indução máxima (B_{\max}).

$$W_h = 96 \times B_{\max}^2 + \frac{3224 \times B_{\max}^{1.4}}{\ell} \quad (4)$$

A aplicação da Equação 4 permite relacionar a elevação das perdas histeréticas e o processo de fragmentação dos grãos em razão da deformação plástica. Esta estimativa é descrita pela Figura 5, onde um tamanho de grão equivalente (Tg calc.) foi calculado. A Figura 5 ilustra a redução do tamanho de grão equivalente com o decorrer da deformação plástica num processo semelhante à fragmentação do grão para a formação células, uma estrutura característica de materiais deformados plasticamente. Dados publicados por Swann⁽¹²⁾ (e posteriormente citados por Doherty)⁽¹³⁾ relatam o tamanho das células em função da quantidade de deformação. Os resultados de Swann vão ao encontro do relatado pela Figura 5.

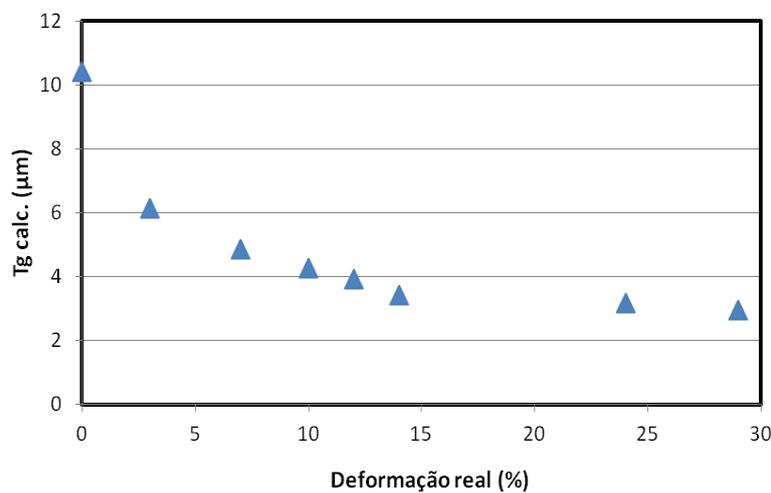


Figura 5. Gráfico do tamanho de grão calculado através da Equação 4 em função da deformação real.

A Figura 6 mostra os resultados dos ensaios de medição de ruídos Barkhausen descritos pela envolvente do valor médio quadrático dos pulsos de Barkhausen. Para as medições o campo magnético aplicado partiu-se de um valor máximo diminuindo para um valor mínimo. Os pulsos de Barkhausen estão distribuídos ao longo de uma faixa entre +2.500 A/m e -5.000 A/m. O campo coercivo observado para essas amostras (mesmo para o maior grau de deformação em indução máxima de 1,6 T) não supera o valor de 450 A/m. Dessa maneira, a largura da curva descrita

na Figura 6 se estende para além da movimentação de paredes de domínio de 180°, que se espera ocorrer próximo do campo coercivo, para incluir a eliminação dos domínios de fechamento de 90°. A amostra como recebida apresenta dois picos de atividade Barkhausen enquanto as deformadas apresentaram único pico cuja amplitude aumenta com a deformação. Um artigo recente⁽⁴⁾ também relata uma estrutura de dois picos para amostra não deformada e sendo que essa estrutura inicial teve sua forma modificada após pequenas deformações no sentido de se formar uma curva com um único pico para as deformações mais elevadas. Esse trabalho mencionou que micro-tensões poderiam exercer influência neste comportamento. Outros artigos^(14,15) discutiram a presença da estrutura de dois picos em termos de dois mecanismos microestruturais: a nucleação e aniquilação de paredes de domínios de 90° no contorno de grão e o salto das paredes de domínios de 180° ancoradas por partículas de segunda fase. A importância desses dois mecanismos foi discutida por Sakamoto, Okada e Homma.⁽¹⁶⁾ A ação das paredes de 90° no contorno de grão conduziria a uma contribuição no ruído de Barkhausen dependente do tamanho de grão e que pode levar a um aumento em V_{RMS} . No entanto, não esperamos que modificações no tamanho de grão tenham efeito significativo. Um estudo recente do ruído Barkhausen em ferro Armco⁽¹⁷⁾ comercial mostrou que o pico central do Barkhausen se torna mais pronunciado para amostras deformadas e com um notável aumento na intensidade do sinal para campos de valores negativos. O aumento contínuo da altura do pico com a deformação no caso do ferro Armco foi explicado pelo papel dominante dos emaranhados de discordâncias se comparado com a influência da micro-tensão remanescentes. Talvez, um fenômeno similar esteja ocorrendo aqui.

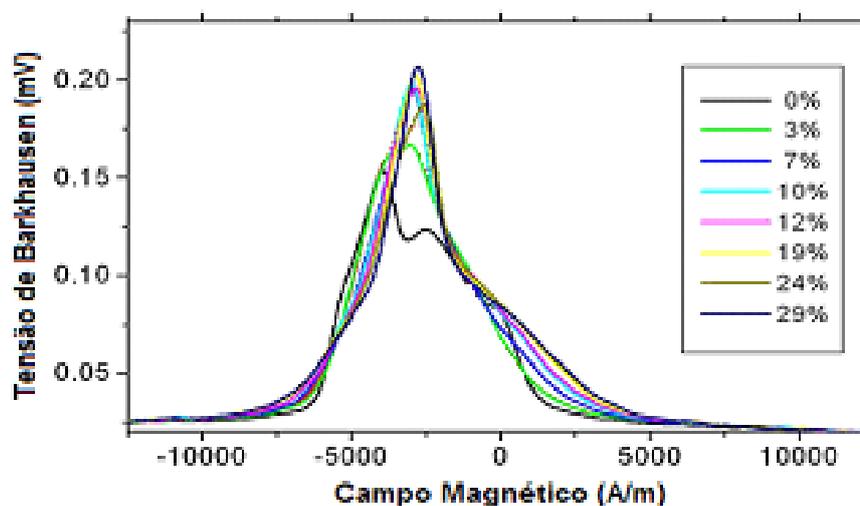


Figura 6. Tensão de Barkhausen em função do campo magnético para amostras com diferentes quantidades de deformação.

Outra característica da ação do processo de deformação é exibida na Figura 7 onde é mostrada a área integrada sob as curvas da tensão de Barkhausen da Figura 6 em função da deformação plástica. Há rápido aumento na área do pico de Barkhausen, conforme maior número de discordâncias são geradas para as menores deformações, seguido por saturação (assim que a subestrutura de células começa a se formar). Esse comportamento é similar ao indicado pelos picos de difração da Figura 1 assim como o observado para um aço baixo carbono laminado a frio.⁽¹⁸⁾

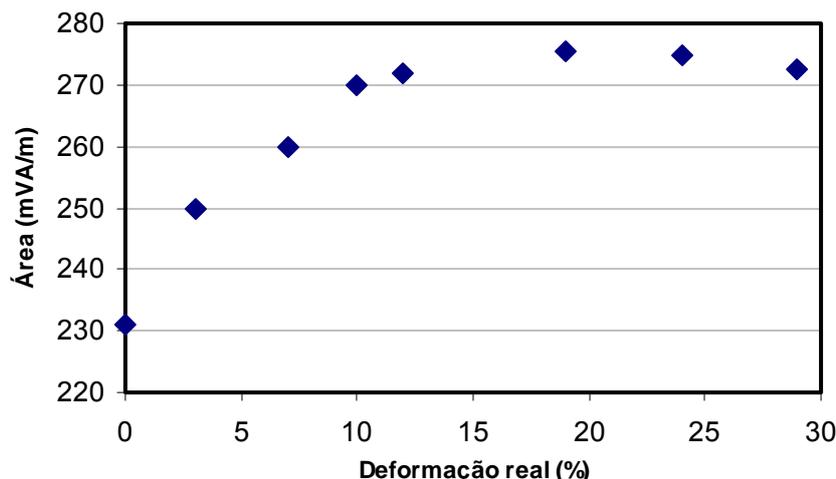


Figura 7. Área integrada dos picos de Barkhausen em função da deformação real.

O aumento nas áreas de Barkhausen se torna mais pronunciado se esses dados são corrigidos pela diminuição da espessura das amostras. Nota-se a partir da Figura 8 que a razão entre essas duas grandezas é sempre crescente com a deformação real não havendo saturação. Uma hipótese para essa relação reside no modo como as medições do ruído de Barkhausen são executadas. O fato de a bobina sensora envolver todo o corpo de prova torna a espessura do mesmo uma variável determinante do volume de material que está sob ensaio.

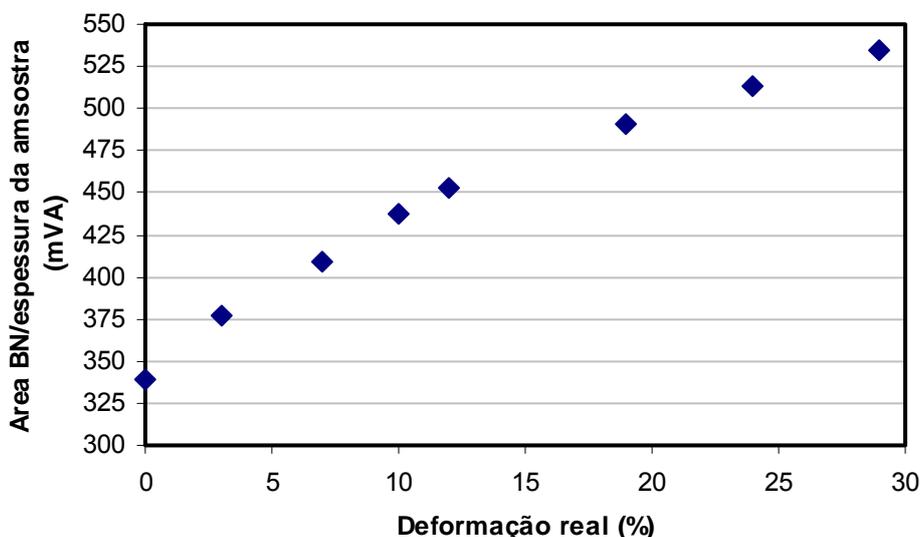


Figura 8. Gráfico mostrando a razão entre área integrada dos picos de Barkhausen e a espessura das amostras em função da deformação real.

4 CONCLUSÕES

A partir da espessura das linhas de difração de raios X foi possível estimar o aumento da densidade de discordâncias causada pelo procedimento de deformação plástica.

As perdas histeréticas são a principal razão para o aumento da perda total em razão da deformação plástica. Perdas de excesso diminuem para valores desprezíveis

com a deformação indicando pequena distância entre paredes de domínio, causada pela fragmentação do grão.

As medidas de ruído de Barkhausen indicam forte contribuição da eliminação dos domínios de fechamento. A área associada com o rápido aumento da atividade de Barkhausen em direção a uma saturação com o aumento da deformação, é resultado de uma estrutura de discordâncias mais complexa.

Agradecimentos

D. L. Rodrigues-Jr agradece à Capes pelo apoio financeiro. M. F. de Campos, F. P. Missell e F. J. G. Landgraf agradecem ao apoio do CNPq. Os autores agradecem a F. Giroto pelo auxílio durante as medições de ruídos de Barkhausen.

REFERÊNCIAS

- 1 K. Eloit, A. De Paepe, J. Dilewijns, C. Standaert "Relation between magnetic properties and changes in dislocation and cell structure due to cold deformation" J. Magn. Magn. Mater. vol. 157/158, pp. 459-460, 1996.
- 2 F.J.G. Landgraf, M. Emura "Loss and permeability improvement by stress relieving fully processed electrical steels with previous small deformations" J. Magn. Magn. Mater. vol. 242, pp. 152-156, 2002.
- 3 M. F. de Campos, T. Yonamine, M. Fukuhara, F. J. G. Landgraf, C. A. Achete, F. P. Missell "Effect of frequency on the iron losses of 0.5% and 1.5% Si nonoriented electrical steels" IEEE Trans. Magn. vol. 42, pp. 2812-2814, 2006.
- 4 R. Baiotto, G. Gerhardt, M. Fukuhara, T. Yonamine, F. P. Missell "Barkhausen noise and magnetic properties of plastically deformed silicon steels" IEEE Trans. Magn. vol. 46, pp. 294-297, 2010.
- 5 M. F. de Campos, M. J. Sablik, F. J. G. Landgraf, T. K. Hirsch, R. Machado, R. Magnabosco, C. J. Gutierrez, and A. Bandyopadhyay "Effect of rolling on the residual stress and magnetic properties of a 0.5% Si electrical steel" J. Magn. Magn. Mater. vol. 320, pp. 377-380, 2008.
- 6 A.S. Keh, S. Weissman, "Electron Microscopy and Strength of Crystals", Interscience, pp. 231-300, New York, 1963.
- 7 A. J. Moses, N. Derebasi, G. Loisos, A. Schoppa "Aspects of the cut edge effects stress on the power loss and flux density distribution in electrical steel sheets" J. Magn. Magn. Mater. vol. 215/216, pp. 690-692, 2000.
- 8 M. J. Sablik, T. Yonamine, F. J. G. Landgraf "Modeling plastic deformation effects in steel on hysteresis loops with the same maximum flux density" IEEE Trans. Magn. vol. 40, pp. 3219-3226, 2004.
- 9 B.L Li., A. Godfrey, Q. Liu." Subdivision of original grain during cold-rolling of interstitial-free steel". Scripta Materialia vol. 50, pp. 879-883, 2004.
- 10 M. F. de Campos, J. C. Teixeira, F. J. G. Landgraf " J. Magn. Magn. Mater. Vol. 301 pp. 94-99, 2006.
- 11 D. L. Rodrigues-Jr, J. R. F. Silveira, F. J. G. Landgraf. "Combining Mager and Steinmetz: the effect of grain size and maximum induction on hysteresis energy loss" IEEE Trans. Magn. Vol. 47, Issue: 9 Pp. 2179-2183.
- 12 P. R. Swann "Electron Microscopy and the Strength of Crystals" (editado por G. Thomas and J. Washburn), p. 131. 1963: New York (Interscience Publishers).
- 13 R. D. Doherty "The Deformed State and Nucleation of Recrystallization" The Metals Society, 1974.
- 14 X. Kleber, A. Vincent "On the role of residual internal stresses and dislocations on Barkhausen noise in plastically deformed steel" NDT&E Int. vol. 37, pp. 439-445, 2004.

- 15 J. A. Pérez-Benítez, J. Capó-Sánchez, J. Anglada-Rivera, L. R. Padovese “A model for the influence of microstructural defects on magnetic Barkhausen noise in plain steels” J. Magn. Magn. Mater. vol. 288, pp. 433-442, 2005.
- 16 H. Sakamoto, M. Okada, M. Homma, “Theoretical analysis of Barkhausen noise in carbon steels” IEEE Trans. Magn. vol. 23, pp. 2236-2238, 1987.
- 17 L. Piotrowski, B. Augustyniak, M. Chmielewski, E. V. Hristoforou, K. Kosmas, “Evaluation of Barkhausen noise and magnetoacoustic emission signals properties for plastically deformed Armco iron” IEEE Trans. Magn. vol. 46, pp. 239-242, 2010.
- 18 H. Kikuchi, K. Ara, Y. Kamada, S. Kobayashi “Effect of microstructure changes on Barkhausen noise properties and hysteresis loop in cold rolled low carbon steel” IEEE Trans. Magn. vol. 45, pp. 2744-2747, 2009.