

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA DEFORMAÇÃO PLÁSTICA SOBRE O CICLO DE HISTERESE EM AÇO ELÉTRICO DE GRÃO NÃO-ORIENTADO¹

Daniel Luiz Rodrigues Junior²
 João Ricardo Filipini da Silveira³
 Fernando José Gomes Landgraf⁴
 Thomas Seiji Pascoto Nishikawa⁵

Resumo

Este trabalho discute o efeito da deformação plástica sobre a energia dissipada por histerese, campo coercivo e indução remanente em aço elétrico de grão não orientado (GNO). A caracterização magnética foi executada em regime quase estático a 5mHz para diversos valores de indução máxima. Os resultados mostraram que tanto a energia dissipada quanto o campo coercivo variaram linearmente com a raiz quadrada da deformação real. A subdivisão da perda histerética indicou que, além do ancoramento das paredes de domínio por discordâncias, tensões residuais também contribuem para a dissipação de energia. A indução remanente apresentou queda com a evolução da deformação plástica.

Palavras-chave: Aço elétrico de grão não orientado; Deformação plástica; Perda histerética; Campo coercivo; Indução remanente.

ANALYSIS OF THE PLASTIC DEFORMATION INFLUENCE ON HYSTERESIS LOOP IN NON ORIENTED ELECTRICAL STEEL

Abstract

This paper discusses about the effect of plastic deformation on the energy dissipated by hysteresis, remanent induction and coercive field in non oriented electrical steel. Magnetic characterization was performed under quasi-static regime at 5mHz for various maximum induction values. The results showed that both the energy dissipated and coercive field varied linearly with the square root of the true deformation. The hysteresis loss subdivision indicated beside that domain walls pinning by dislocations, residual stress also contribute to energy dissipation. The remanent induction decreased with the evolution of plastic deformation.

Keywords: Non oriented electrical steel; Plastic deformation; Hysteresis loss; Coercive field; Remanent induction.

¹ Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.

² Mestre em Engenharia de Materiais – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica, Universidade São Paulo – USP.

³ Bacharel em Engenharia de Materiais – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica, Universidade São Paulo – USP.

⁴ Professor Doutor – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica, Universidade São Paulo – USP.

⁵ Graduando em Engenharia Metalúrgica – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica, Universidade São Paulo – USP

1 INTRODUÇÃO

Aços elétricos são empregados principalmente na produção de máquinas elétricas e dispositivos para a geração de energia. Nos dias de hoje o principal impulso para o desenvolvimento desse material é a necessidade redução de consumo de energia.⁽¹⁾ Sendo assim, esforços devem ser conduzidos no sentido de proporcionar maior conhecimento dos mecanismos que levam à dissipação de energia nesses aços durante a operação de magnetização e desmagnetização a qual são submetidos durante a aplicação.

Esses aços, inicialmente disponível na forma de chapas laminadas, devem sofrer puncionamento para que sejam cortadas peças de tamanho e forma adequadas à fabricação de dispositivos elétricos. Durante essa etapa, deformação plástica é introduzida no material devido a tensões de cisalhamento.⁽²⁾ Essa deformação é mais intensa nas extremidades próximas ao corte e diminui com a distância a partir dessas extremidades. Mesmo o empilhamento dessas peças laminadas para a construção de rotores e estatores submete o material a tensões.⁽³⁾

Trabalhos anteriores já abordaram a relação de dependência entre microestrutura e propriedades magnéticas em materiais magneticamente moles^(4,5) e a deformação plástica é conhecida por causar deterioração dessas propriedades.⁽⁶⁾ Sendo assim, a deformação plástica introduzida nesses aços (inerente ao processo de fabricação) tem influência no desempenho energético de máquinas elétricas, fazendo com que essas dissipem mais energia durante o uso. Diante desse fato, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o ciclo de histerese magnética de amostras deformadas a frio e confrontar os dados extraídos a partir desses ciclos (energia dissipada por histerese e campo coercivo) com a evolução da deformação plástica.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O material de partida escolhido para a execução desse trabalho foi uma bobina de aço elétrico de grão não-orientado completamente processado e sem laminação de encruamento. A composição química desse material é descrita na Tabela 1. A espessura do material como recebido era de 0,681 mm. O procedimento experimental desse trabalho foi composto por duas etapas: produção das amostras e caracterização magnética.

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	0,8185	0,2154	0,008	0,016	0,005	0,0011	0,0025

2.1 Produção das Amostras

O método escolhido para prover deformação plástica ao material foi a laminação a frio. O procedimento foi conduzido em um laminador dotado de tração avante e à ré na empresa Brasmetal Waelzholz.

A quantidade de deformação foi avaliada comparando-se a espessura das chapas laminadas com a espessura do material como recebido. A laminação foi executada de modo contínuo, ou seja, todo o material foi passado no laminador de uma só vez e a distância entre os cilindros do laminador foi diminuída a cada 1,5 m de chapa laminada. Dessa forma, obteve-se ao término da laminação uma grande

chapa de material laminado onde o grau de deformação varia a cada 1,5 m (no sentido do comprimento da chapa) formando degraus.

O corte das amostras foi realizado inicialmente na região do degrau dividindo a chapa laminada em chapas menores de acordo com sua espessura. Essas chapas foram levadas a uma guilhotina, onde foram cortadas em lâminas de dimensões adequadas para a etapa de caracterização magnética (300x30 mm). O corte foi realizado de maneira que o comprimento dessas amostras fosse mantido paralelo à direção de laminação. Para cada grau de deformação (critério segundo o qual essas amostras foram agrupadas) foram produzidas doze lâminas. Dessa forma, foram produzidos nove conjuntos de amostras compostos por doze lâminas cada um. A quantidade de deformação e a espessura após a laminação desses conjuntos estão listadas na Tabela 2, onde "S/lam" corresponde ao material como recebido (sem laminação) e as demais amostras estão identificadas em ordem alfabética de acordo com a quantidade de deformação calculada segundo a Equação 1, onde e_f e e_i são as espessuras do material após a laminação e como recebido, respectivamente.

$$Deformação = \ln \left(\frac{e_i}{e_f} \right) \quad \text{Equação 1}$$

Tabela 2: Espessura final e quantidade de deformação real das amostras laminadas a frio

Nome	S/Lam	A	B	C	D	E	F	G	H
Espessuras (mm)	0,681	0,667	0,663	0,635	0,617	0,601	0,561	0,536	0,510
Deformação real (%)	0	2	3	7	10	12	12	24	29

2.2 Caracterização Magnética

Esta etapa do procedimento experimental contou com o uso de um quadro de Epstein. Esse aparelho consiste de quatro solenóides cada um compostos por duas bobinas. Esses solenóides são dispostos de maneira a formar um circuito magnético fechado. As amostras são posicionadas no interior desses solenóides.

As bobinas externas do solenóide (também chamadas de primárias) são ligadas em série e por elas circula uma corrente elétrica fornecida por um gerador de corrente de forma que essas bobinas passem a fornecer o campo magnético para a magnetização das amostras. Sobre as bobinas internas (secundárias), também ligadas em série, recai a tensão induzida pelas variações de indução magnéticas provocadas pela magnetização e desmagnetização das amostras. Esses valores de corrente e tensão são coletados e armazenados em uma base de dados para que possam ser calculados os valores de campo magnético aplicado e indução magnética.

A perda histerética foi medida em ensaio quase-estático a 5mHz para indução máxima variando entre 0,4 T e 1,6 T. Desses ensaios foram extraídos os ciclos de histerese magnética e a perda histerética (Ph). A partir do ciclo de histerese foram calculados, para cada valor de indução máxima, o campo coercivo e indução remanente.

A energia dissipada na histerese (Wh) foi calculada através do valor da perda histerética medida no ensaio quase estático através da Equação 2, onde f corresponde à frequência (60 Hz) e d é a densidade do material. Essa energia corresponde à área da histerese.

$$Wh = \frac{Ph \times d}{f}$$

Equação 2

A subdivisão dos ciclos de histerese em regiões de baixa e alta indução segue o procedimento descrito por Landgraf.⁽⁷⁾ Por esse método, a região de baixa indução é aquela delimitada pelas induções correspondentes aos pontos de permeabilidade máxima ($B_{\mu\max}$ e $-B_{\mu\max}$), sendo o primeiro localizado no ramo de subida do primeiro quadrante do ciclo de histerese e o segundo no ramo de descida do terceiro quadrante. A região alta indução corresponde à soma das áreas do ciclo localizadas acima de $B_{\mu\max}$ e abaixo de $-B_{\mu\max}$, conforme indica a Figura 1.

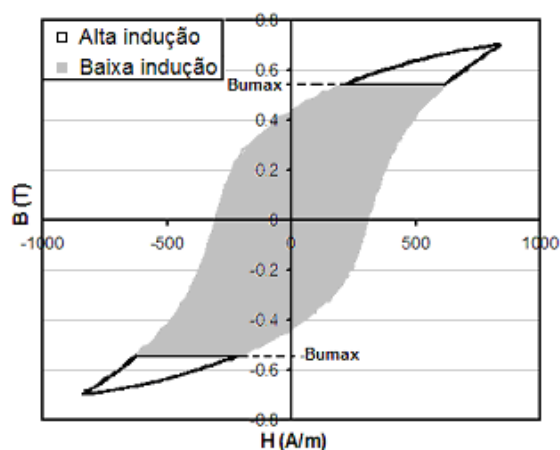


Figura 1: Subdivisão do ciclo de histerese em regiões de alta e baixa indução.

3 RESULTADOS

Como dito anteriormente, as amostras foram submetidas à caracterização magnética para extração dos ciclos de histerese em regime quase estático para diversos valores de indução máxima. A Figura 2 traz os ciclos de histerese (para indução máxima de 1T) do material como recebido (S/Lam) e também das amostras submetidas à deformação por laminação a frio.

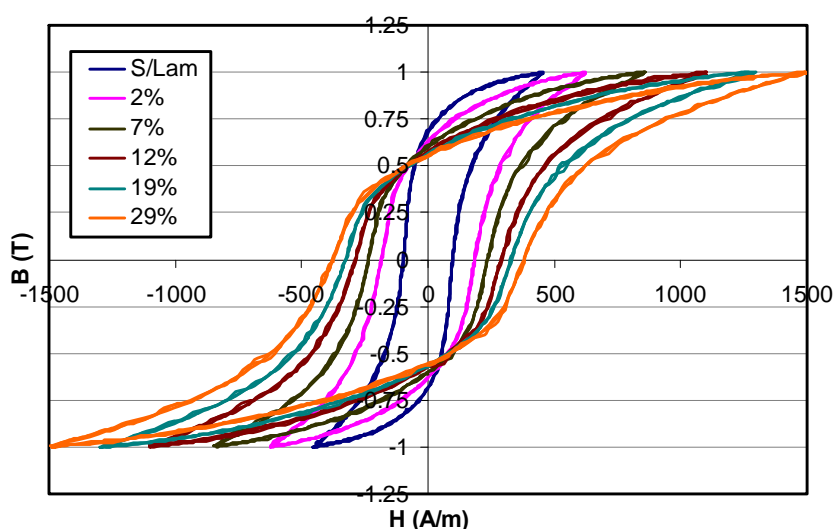


Figura 2: Ciclos de histerese magnética a 5mHz com indução máxima de 1T.

4 DISCUSSÃO

Nessa seção, discute-se algumas relações entre propriedades magnéticas e deformação plástica. Propriedades estas que foram extraídas a partir de ciclos como o da Figura 2. Primeiramente, aborda-se o efeito da deformação plástica sobre a área da histerese que corresponde à energia dissipada por ciclo. Em seguida, discute-se o efeito da deformação sobre dois pontos característicos do ciclo de histerese: campo coercivo e indução remanente.

4.1 Energia Dissipada por Histerese

Analisando-se a Figura 2, nota-se que a deformação plástica provoca aumento da área do ciclo de histerese, ou seja, ocorre a diminuição do rendimento energético do material com conseqüente aumento da energia dissipada por histerese. De fato, os resultados expostos na Figura 3 descrevem crescimento linear da energia dissipada por histerese em função da raiz quadrada da deformação. A mesma lei de dependência foi verificada em artigo publicado por Hou.⁽⁸⁾ O autor atribuiu a ação deletéria da deformação sobre as propriedades magnéticas ao aumento da densidade de discordâncias. Esses defeitos cristalinos atuam como sítios de ancoramento, impedindo a movimentação das paredes de domínios. Sendo assim, maior quantidade de energia deve ser necessária para que as paredes possam se desprender desses defeitos e continuar a se mover durante o processo de magnetização.

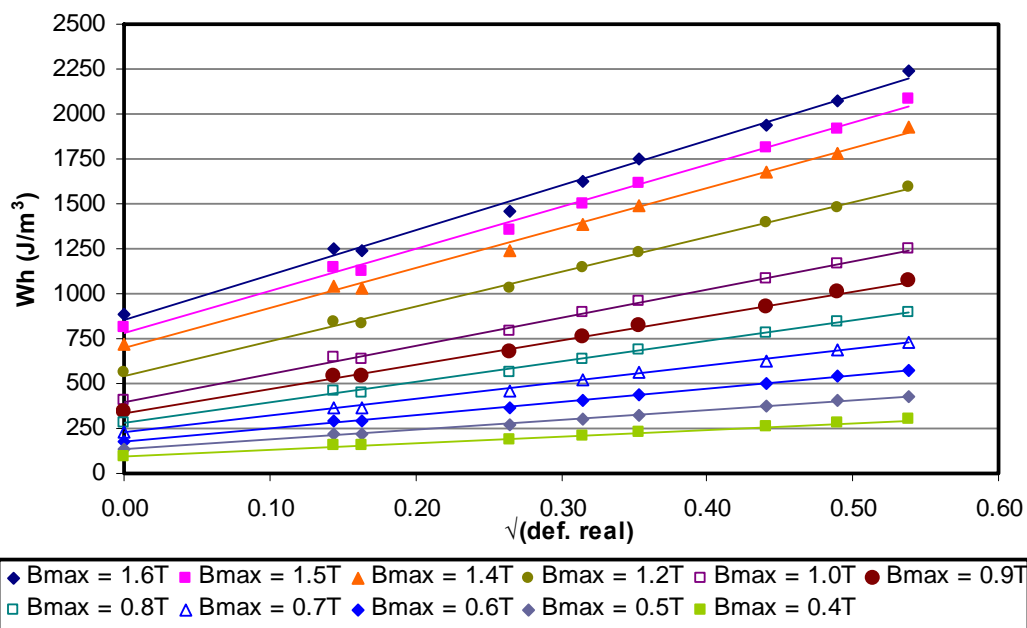


Figura 3: Gráfico mostrando o crescimento linear da energia dissipada por histerese com a raiz quadrada da deformação real.

É sabido que, durante o processo de magnetização, a movimentação de paredes é dominante predominante na região de baixa indução do ciclo de histerese. O gráfico da energia dissipada na região de baixa indução (L_{Wh}) em função da deformação real pode ser visto na Figura 4.

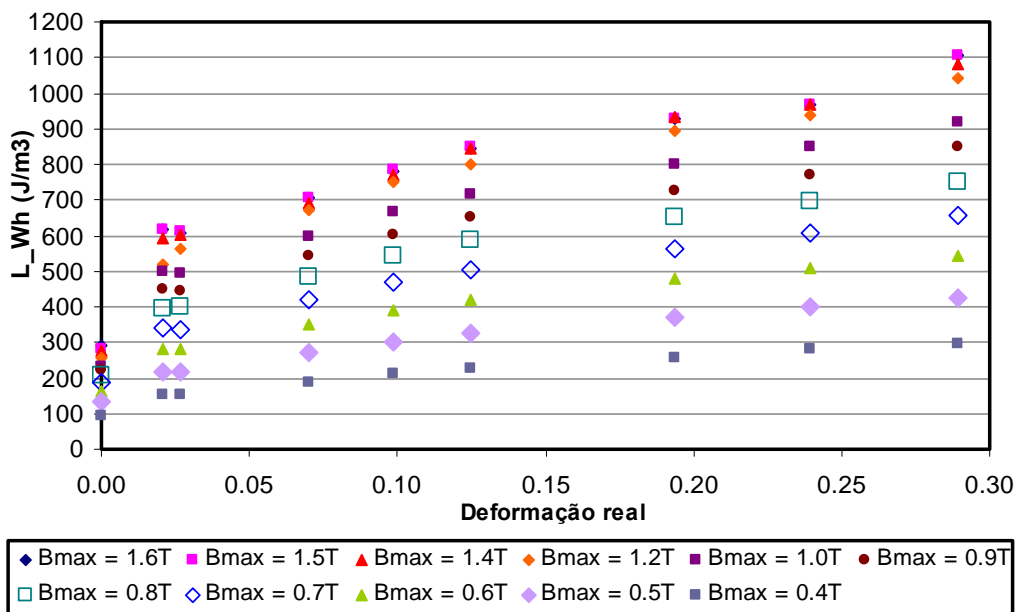


Figura 4: Energia dissipada por histerese na região de baixa indução em função da deformação real.

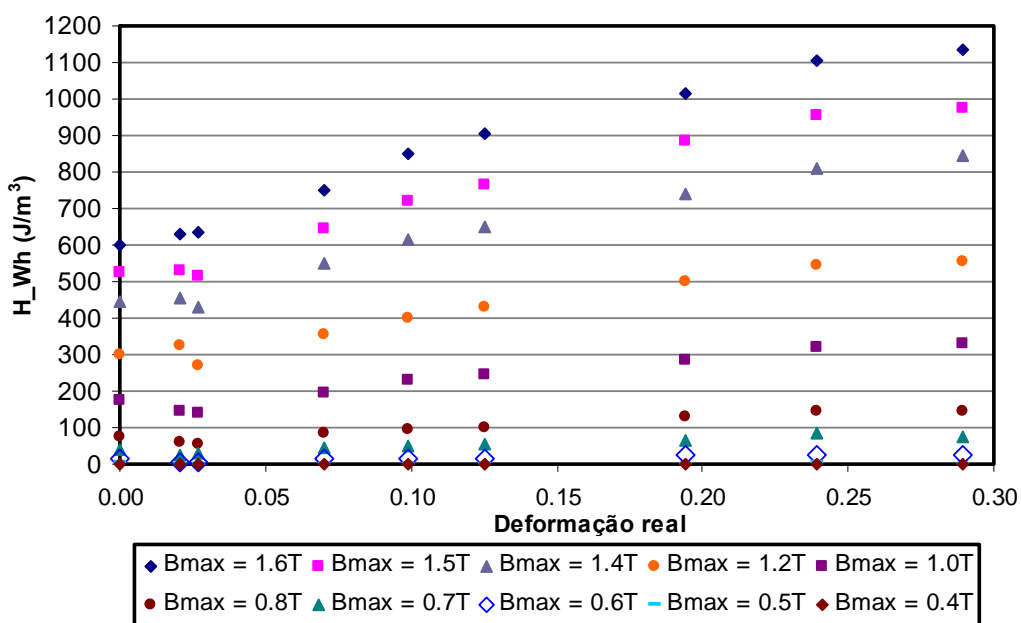


Figura 5: Energia dissipada por histerese na região de alta indução em função da deformação real.

Na Figura 5, nota-se que a deformação plástica também provocou aumento da energia dissipada por histerese na região de alta indução. Isso indica que a interação entre paredes de domínio e discordâncias talvez não seja o único mecanismo a explicar o aumento da energia dissipada em função da deformação plástica. De acordo com Landgraf et al.,⁽⁹⁾ é possível que tensões residuais afetem o mecanismo nucleação e aniquilação de domínios, principal responsável pela dissipação de energia na região de alta indução do ciclo de histerese. Tensões residuais surgem porque a tensão externamente aplicada durante o processo de deformação plástica não é uniformemente distribuída ao longo do material. Grãos

são submetidos a diferentes quantidades de deformação uma vez que seu limite de escoamento depende de sua orientação cristalográfica.⁽¹⁰⁾

4.2 Campo Coercivo

Retomando-se a Figura 2, observa-se influência da deformação plástica sobre o campo coercivo. Assim como a energia dissipada por histerese, o campo coercivo também varia linearmente com a raiz quadrada da deformação real, conforme mostra a Figura 6. A mesma lei de dependência foi verificada por Sablik⁽¹¹⁾ que relaciona esse fato à diminuição da mobilidade das paredes de domínio provocado por ancoramento em discordâncias.

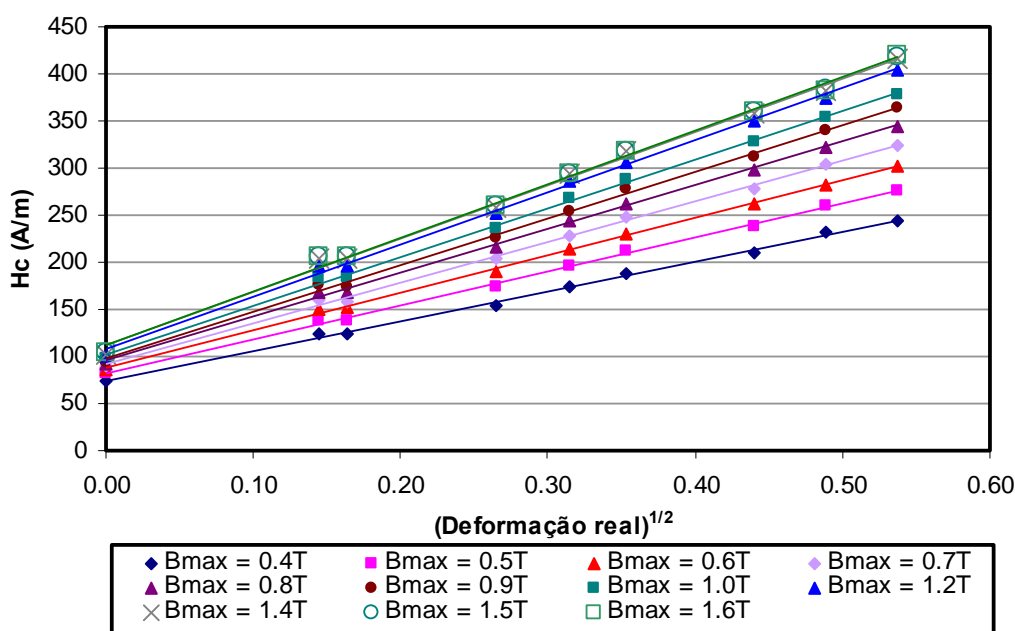


Figura 6: Gráfico do campo coercivo em função da raiz da deformação real para diferentes valores de indução máxima.

4.3 Indução Remanente

A Figura 7 indica que diminuição da indução remanente (B_r) com o aumento da deformação plástica, no entanto essa tendência é fraca quando se trata dos menores valores de indução máxima. Por exemplo, para 0,4 T, a variação de indução remanente com a deformação plástica é insignificante. Para os valores mais elevados a diminuição de B_r é mais acentuada para pequenas deformações. Outra consequência da deformação plástica é a diminuição da indução remanente sendo esta mais acentuada para maiores valores de indução máxima.

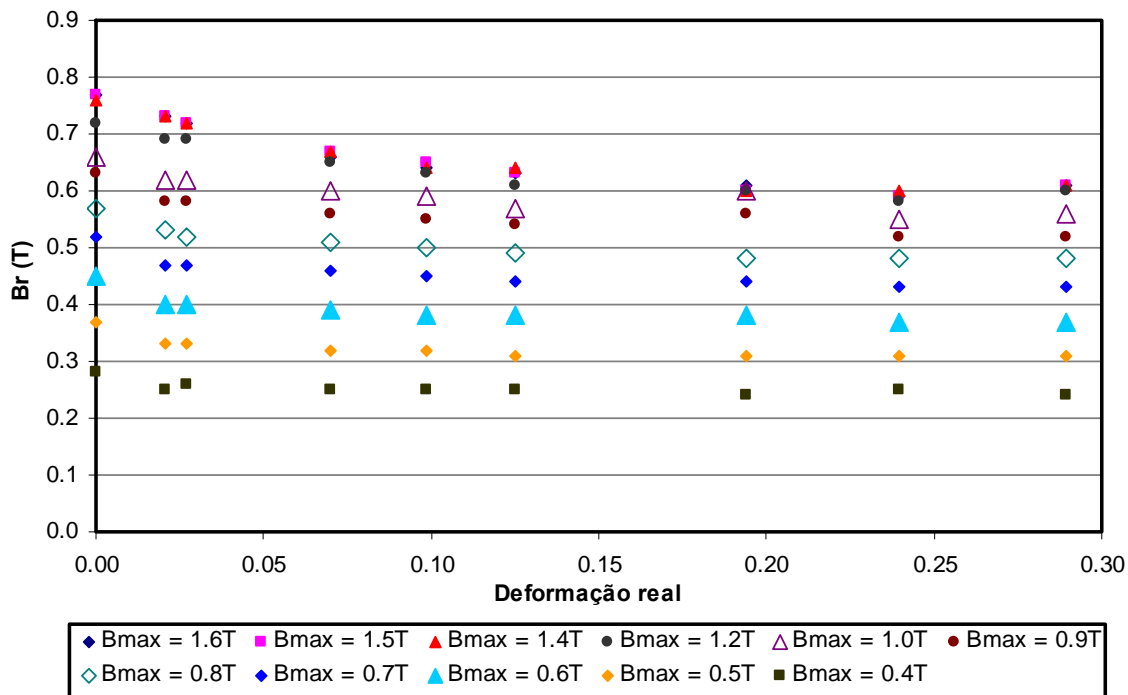


Figura 7: Indução remanente (Br) em função de deformação real para diferentes valores de indução máxima.

5 CONCLUSÃO

Foi verificado que a deformação plástica provoca degradação das propriedades magnéticas em aços elétricos de grão não orientado. Os resultados mostram que tanto a energia dissipada por histerese quanto o campo coercivo aumentam linearmente com a raiz quadrada da deformação plástica. Esse fenômeno também atua no crescimento da energia dissipada, porém esta também é influenciada por tensões residuais.

Agradecimentos

Os autores agradecem à empresa Waelzholz pela por, gentilmente, ceder e laminar o material utilizado nesse trabalho, à Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior – CAPES pelo apoio financeiro e ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT por viabilizar a execução da caracterização magnética das amostras.

REFERÊNCIAS

- 1 FISCHER, O., SCHNEIDER, J. Influence of deformation process on the improvement of non-oriented electrical steel. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 254–255 (2003) 302–306.
- 2 MOSES, A. J., DEREBASI, N., LOISOS, G., SCHOPPA, A., Aspects of the cut-edge effect stress on the power loss and flux density distribution in electrical steel sheets. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 215-216 (2000) 690-692.
- 3 LOBUE, M., SASSO, C., BASSO, V., FIORILLO, F., BERTOTTI, G. Power losses and magnetization process in Fe-Si non-oriented steels under tensile and compressive stress. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 215-216 (2000) 124-126.



- 4 BARROS, J., SCHNEIDER, J., VERBEKEN, K., HOUBAERT, Y. On the correlation between microstructure and magnetic losses in electrical steel. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 320 (2008) 2490-2493.
- 5 BERTOTTI, G. Connection between microstructure and magnetic properties of soft magnetic materials. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 320 (2008) 2436–2442.
- 6 ELOOT, K., De PAEPE, A., DILEWIJNS, J., STANDAERT, C. Relation between magnetic properties and changes in dislocation and cell structure due to cold deformation. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 157/158 (1996) 459-460.
- 7 LANDGRAF, F. J. G., de CAMPOS, M. F., LEICHT, J. Hysteresis loss subdivision. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 320 (2008) 2494–2498.
- 8 HOU, C.K., LEE, S. Effect of rolling strain on the loss separation and permeability of lamination steels. *IEEE Transactions on magnetics*, Vol. 30, N^o. 2, March 1994.
- 9 LANDGRAF, F. J. G., EMURA, M., ITO, K., CARVALHO, P. S. G. Effect of plastic deformation on the magnetic properties of non-oriented electrical steels. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 215-216 (2000) 94-96.
- 10 MAKAR, J.M., TANNER, B.K. The effect of plastic deformation and residual stress on the permeability and magnetostriction of steels. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 222 (2000) 291–304.
- 11 SABLİK, M. J., YONAMINE, T., LANDGRAF, F.J.G. Modeling plastic deformation in steel on hysteresis loop with the same maximum flux density. *IEEE Transactions on magnetics*, Vol. 40, N^o 2, September 2004.