

Trabalho a ser apresentado no 57 Congresso Anual da ABM  
Código 0505

## **EFEITO DA INDUÇÃO MÁXIMA NAS PERDAS MAGNÉTICAS DE AÇO 3%SI**

Marília Emura<sup>1</sup>  
Fernando José Gomes Landgraf<sup>2</sup>

### RESUMO

As perdas histeréticas crescem exponencialmente com a indução máxima, segundo a Lei de Steinmetz. Este trabalho mostra que esse comportamento apresenta diferenças de expoente dependendo da direção em que se aplica o campo magnético, em relação à direção de laminação. A subdivisão das perdas mostra que o comportamento do componente de altas induções é dominado pela textura, diferentemente do componente de baixas induções.

Palavras chave: aços elétricos, perdas histeréticas, indução máxima

---

57º Congresso Anual da ABM - 22 a 25 de julho de 2002 – São Paulo

<sup>1</sup>Pesquisadora da Globalmag Transdutores Magnéticos Ind. Com. Ltda.

<sup>2</sup>Pesquisador do IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do ESP

## 1. Introdução

Com o objetivo de desenvolver aços com menores perdas magnéticas, um grupo de pesquisadores centrados no Laboratório de Metalurgia do Pó e Materiais Magnéticos do IPT desenvolveu uma técnica para subdividir as perdas histeréticas em duas parcelas (1,2). Espera-se que cada uma das parcelas esteja associada a mecanismos diferentes de dissipação de energia, e que sua compreensão permita otimizar o desempenho dos aços elétricos.

Inicialmente imaginou-se que os mecanismos seriam os clássicos movimento de paredes de domínios e rotação da magnetização dos domínios. Entretanto, o caráter reversível da rotação de domínios nos cristais cúbicos permite seu papel como mecanismo de magnetização, mas não de dissipação de energia. A literatura internacional não apresenta muitos outros mecanismos. Bertotti fala de mecanismos de nucleação e aniquilação de domínios, em altos campos (3), enquanto Makar e Tanner separam os processos de movimentação de paredes de 180° e paredes de 90° (4).

O prof. Antonio Domingues dos Santos, do Instituto de Física da USP, colocou um desafio interessante, ao discutir um dos trabalhos dessa linha de pesquisa, apresentado no International Conference on Magnetism (5): seria possível demonstrar que as duas subdivisões das perdas histeréticas são variáveis independentes? Caso não fossem, tal subdivisão seria inútil.

A investigação do comportamento angular das perdas histeréticas mostrou que a anisotropia não é devida somente à textura cristalográfica (5). Notou-se comportamentos muito distintos para as parcelas de baixa e de alta indução: enquanto a anisotropia das perdas de alta indução guardava boa correlação com o comportamento de  $B_{50}$  e com a textura cristalográfica, a anisotropia das perdas de baixa indução apresentam comportamento bem diverso (5). M.A. da Cunha, da Acesita, mostrou que essa anisotropia pode ser explicada supondo que a distância entre inclusões não-metálicas, que são centros de ancoramento de paredes, seja máxima na direção de laminação e mínima a 90°, variando com o coseno do ângulo, no intervalo (6).

O presente trabalho visa demonstrar que a variação das perdas com a indução máxima também mostra comportamentos independentes para as duas subdivisões das perdas histeréticas. O efeito do valor da indução máxima nas perdas por histerese foi descrito em um trabalho clássico de Charles Proteus Steinmetz, publicado em 1892 (7). A lei empírica que traduz o crescimento exponencial da área de histerese leva o nome de seu autor:

$$P = A * B^{1,6}$$

Onde P é a energia dissipada em um ciclo de histerese traçado lentamente (J/m<sup>3</sup>)

Trabalho a ser apresentado no 57 Congresso Anual da ABM  
Código 0505

A é uma constante que depende do material em exame  
B é a indução, em tesla.

Medidas posteriores em diferentes materiais mostraram que o expoente 1,6 é válido para diferentes materiais (8). No caso do ferro e ligas FeSi a lei é válida até ao redor de 1,2T, acima do que as perdas crescem mais acentuadamente do que o previsto (8,9). Não conhecemos qualquer trabalho teórico que tenha dado significado físico a esse valor. O modelo teórico das perdas parasitas leva a um expoente 2, e o "modelo estatístico" das perdas excedentes (conhecidas no passado como perdas anômalas) explicita uma dependência com expoente 1,5(9).

O presente trabalho investiga o efeito da indução máxima e da direção de magnetização no comportamento das perdas. É interessante examinar se a conhecida anisotropia das propriedades magnéticas afeta o expoente e, por outro lado, se a anisotropia afeta o nível de indução a partir do qual o coeficiente 1,6 deixa de descrever bem o comportamento experimental. Quanto à subdivisão das perdas, é importante conhecer se esse coeficiente aplica-se mais a uma ou outra

## 2. Materiais e métodos

Utilizou-se amostra de uma das melhores classes de aço silicioso fabricadas pela Acesita, a classe E110. O teor de silício desse material é de 3,25%, e a espessura é de 0,5mm. Foram cortadas por guilhotina lâminas tipo Epstein em vários ângulos em relação à direção de laminação, de 0 a 90° em passos de 10°. Após corte o material passou por um alívio de tensões. Trata-se do mesmo material examinado em trabalho apresentado na ABM em 2001 (10). Naquele trabalho investigou-se o efeito da direção de corte das amostras (e, por conseqüência, a direção da aplicação do campo magnético H) nas perdas a 1,5T, resultados resumidos na Figura 1. No presente trabalho apenas 3 ângulos foram selecionados, 0°, 50° e 90°, e mediu-se o efeito da indução máxima nas perdas histeréticas, na sua subdivisão em componentes de baixa e de alta indução, no valor de B de  $\mu_{\max}$  (que é o parâmetro que separa os dois componentes) e nos valores de  $B_R$  e  $H_C$ .

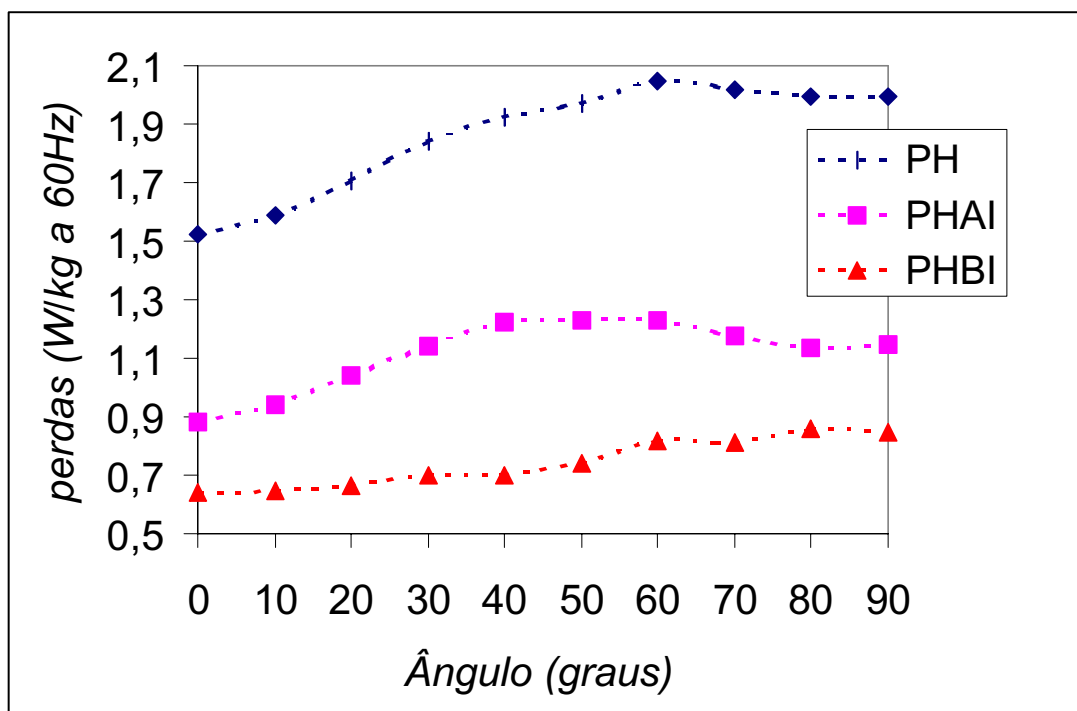
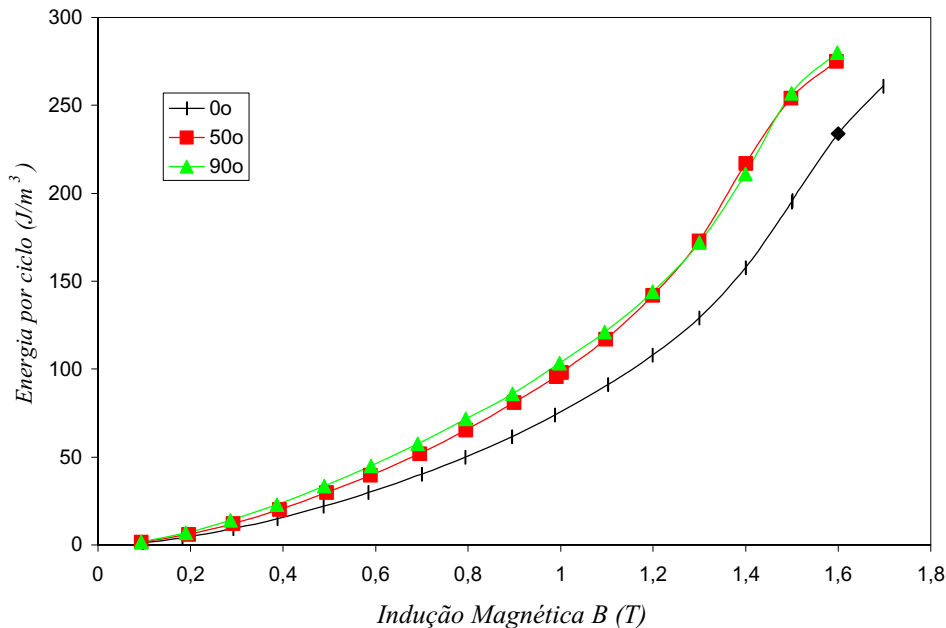


Figura 1. Variação angular das perdas histeréticas (PH) e das componentes de baixa indução (PHBI) e de alta indução (PHAI) (ref. 10)

### 3. Resultados e discussão

A Figura 1 mostra que, para esse aço, a anisotropia das perdas histeréticas é significativa, variando mais de 30% entre o menor e o maior valor. As perdas histeréticas são mínimas com H aplicado na direção de laminação ( $0^{\circ}$ ), passam por um máximo quando H é aplicado a  $60^{\circ}$  e cai para um valor um pouco menor quando H é aplicado na direção transversal da bobina ( $90^{\circ}$ ). A figura mostra também que esse comportamento é seguido pelas perdas de alta indução, enquanto o componente de baixa indução cresce continuamente com o ângulo. O comportamento das perdas histeréticas e de seu componente de altas induções é compatível com a textura do material, que apresenta um forte componente Goss, conforme discutido no artigo anterior. O comportamento diferente do componente de baixas induções foi creditado à anisotropia da distância média entre as inclusões, que é máxima na direção de laminação e cai com o coseno do ângulo, sendo mínima na direção transversal.

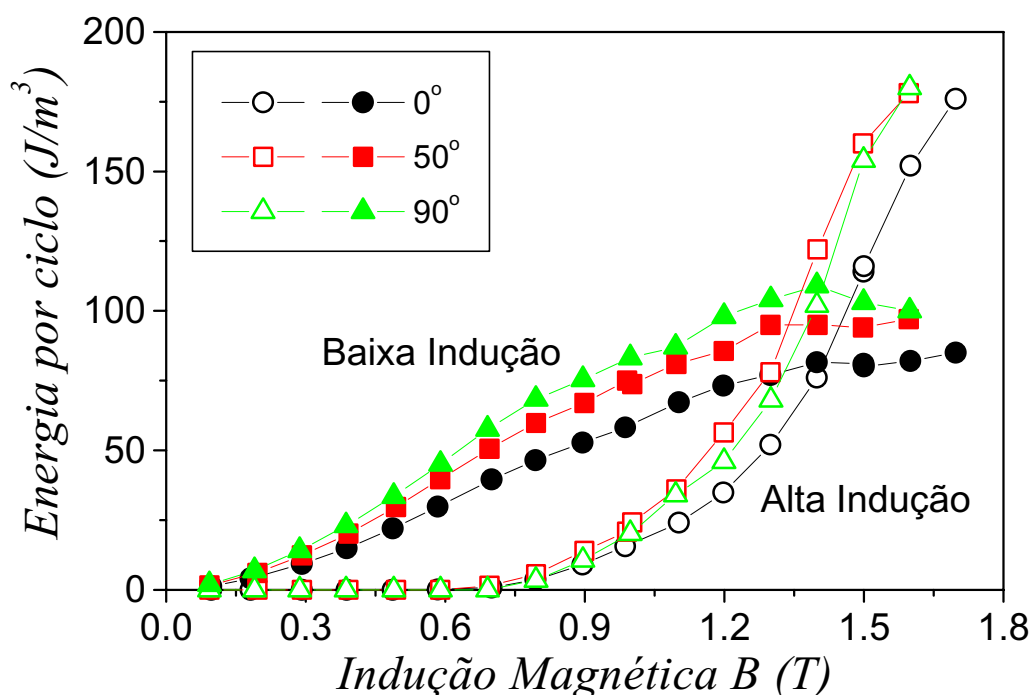
A Figura 2 mostra o efeito da indução máxima nas perdas histeréticas de três amostras. A discussão desses resultados em relação ao equacionamento de Steinmetz será discutida mais à frente. Quanto à anisotropia, nota-se que, em baixas induções, as perdas da amostra cortada a  $90^{\circ}$  são maiores que as demais. A partir de 1,3T o material cortado a  $50^{\circ}$  passa a ser o pior, ficando ambos semelhantes entre 1,5 e 1,6T.



**Figura 2. Efeito da indução máxima e da orientação da amostra na energia dissipada por histerese, por ciclo.**

Notar que, enquanto a Figura 1 apresentou valores das perdas histeréticas em W/kg, a Figura 2 os apresenta em energia dissipada por unidade de volume,  $J/m^3$ . Para transformar os primeiros valores nos segundos, basta multiplicar pela densidade do aço (no caso,  $7600\text{kg}/\text{m}^3$ ) e dividir pela frequência (60Hz).

A Figura 3, ao mostrar o efeito da indução máxima nos dois componentes das perdas histeréticas, diferencia mais claramente a anisotropia do material: as perdas de baixas induções da amostra cortada a  $90^\circ$  têm sempre os maiores valores, em todas as induções, enquanto as perdas histeréticas de altas induções tem seus maiores valores na amostra cortada a  $50^\circ$ . Isso indica que o comportamento notado a 1,5T, na figura 1, está presente em todas as induções máximas. A Figura 3 mostra também que as perdas de altas induções são nulas até 0,7T. Esse comportamento mostra que o método de subdivisão de perdas aqui adotado produz resultados consistentes: até 0,7T a máxima permeabilidade encontrada na curva de histerese é aquela da indução máxima. O comportamento do valor de corte dos dois campos, a indução de  $\mu_{\text{max}}$ , é mostrada na figura 4. Nota-se ainda, na Figura 3, que o componente de baixas induções atinge um valor praticamente constante, acima de 1,3T. Essas significativas diferenças de comportamento dos componentes de baixa indução e de alta indução indicam que eles são variáveis independentes e que provavelmente refletem diferentes mecanismos de dissipação de energia.



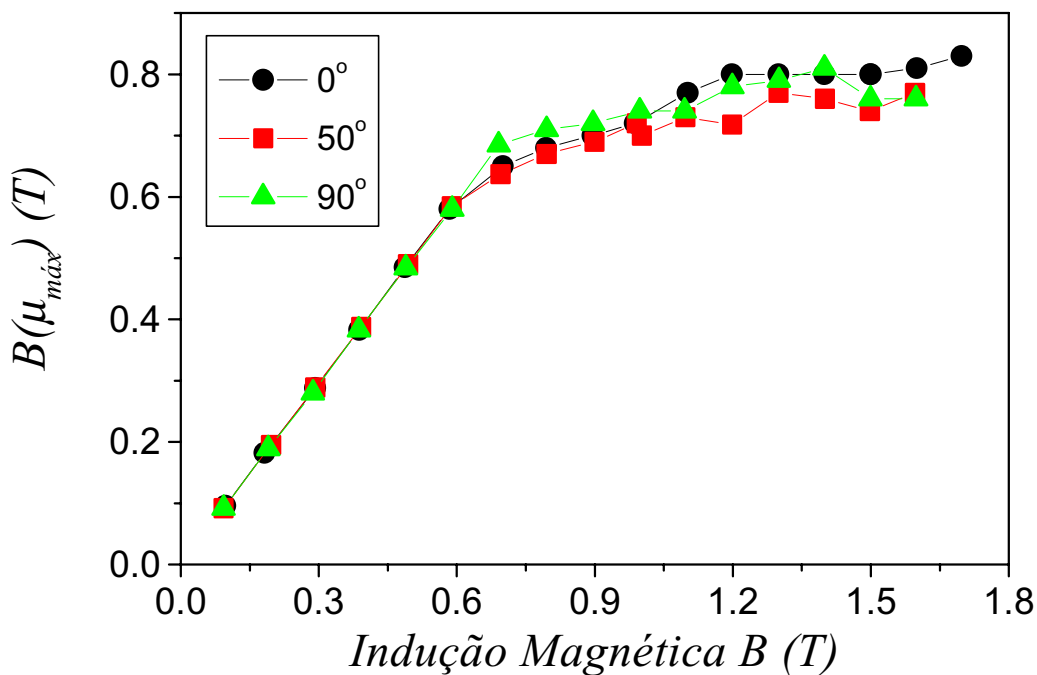
**Figura 3. Variação dos componentes de baixa Indução e de Alta Indução em função do valor da indução máxima.**

Uma questão que tem ficado sem resposta, quando se discute essa subdivisão das perdas histeréticas, refere-se aos possíveis mecanismos que governam a dissipação de energia nos dois componentes. É interessante correlacionar esse comportamento com as medidas de magnetostricção em função da indução máxima. Makar e Tanner (4) mostraram que, em aços não orientados, até 0,7T quase não há magnetostricção, o que é compatível com a predominância de movimentação de paredes de domínio de  $180^\circ$ . Entre 0,7 e 1,5T ocorre um grande crescimento da magnetostricção, associado a movimento de paredes de  $90^\circ$ . Acima de 1,5T a magnetostricção cai e chega a ficar negativa, devido à rotação dos domínios. É tentador querer associar esse movimento de paredes de  $90^\circ$  com o componente de perdas de altas induções, mas ainda assim continua faltando um modelo explicativo do crescimento das perdas associado a esse mecanismo.

A Figura 4 mostra que, até 0,7T, o valor de  $B$  de  $\mu_{max}$  é igual ao valor de  $B_{max}$ . Um resultado surpreendente do presente estudo foi constatar que o valor de  $B$  de  $\mu_{max}$  pouco varia com a direção das amostras, ficando em torno de 0,75T. Como o mecanismo predominante de magnetização até esse ponto é a movimentação das paredes de domínio, parece que o mecanismo de rotação dos domínios, que deve ser muito sensível à textura cristalográfica, pouco afeta a indução no "joelho da curva". Esse comportamento ( $B$  de  $\mu_{max}$  pouco varia com a direção das amostras) não é evidente quando se observa as curvas de histerese, pois o  $H$  necessário para atingir o  $B$  de  $\mu_{max}$  varia bastante com a direção. Mesmo

Trabalho a ser apresentado no 57 Congresso Anual da ABM  
Código 0505

para induções máximas acima de 1,2T, esse H é crescente com o ângulo, tal qual  $H_c$ . Por outro lado, a análise de 15 aços de diferentes procedências e métodos de preparação mostrou que B de  $\mu_{max}$  pode variar entre 0,75 e 0,9T.



**Figura 4. Variação do valor da indução de  $\mu_{max}$  com a indução máxima para amostras cortadas em 3 direções.**

Inicialmente supúnhamos que B de  $\mu_{max}$  acompanhasse a variação da remanência. Entretanto, o comportamento da remanência é bem diverso, como se nota na Figura 5. A remanência cresce até aproximadamente 1,4T, e o menor valor é o das amostras cortadas na direção transversal, para todas as induções.

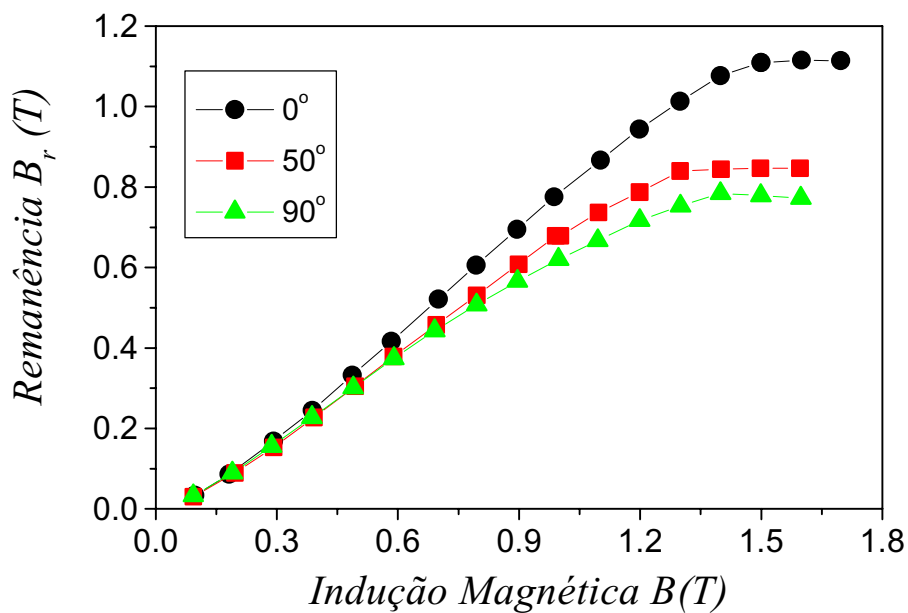


Figura 5. Comportamento da remanência em função da indução máxima, para amostras cortadas em 3 diferentes direções .

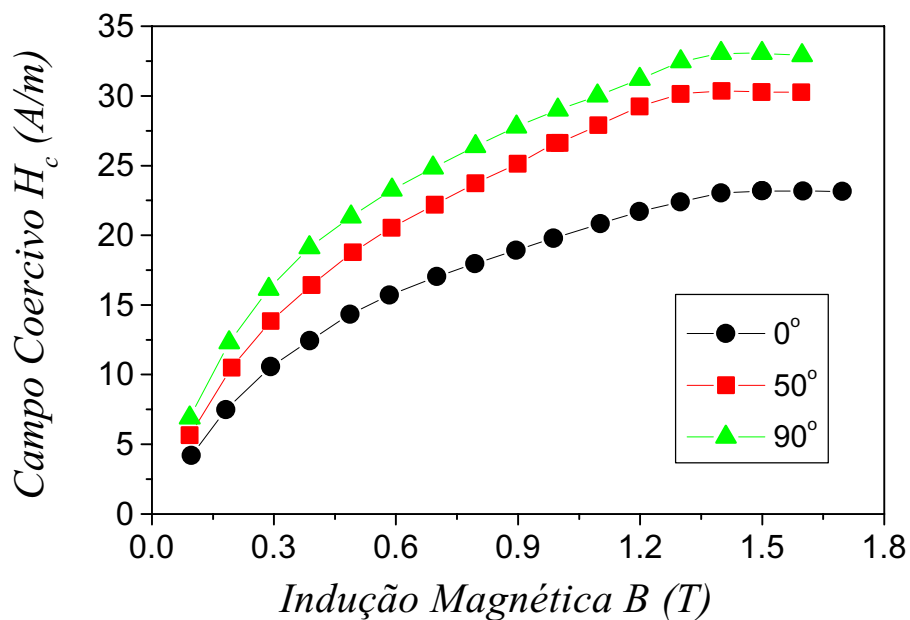


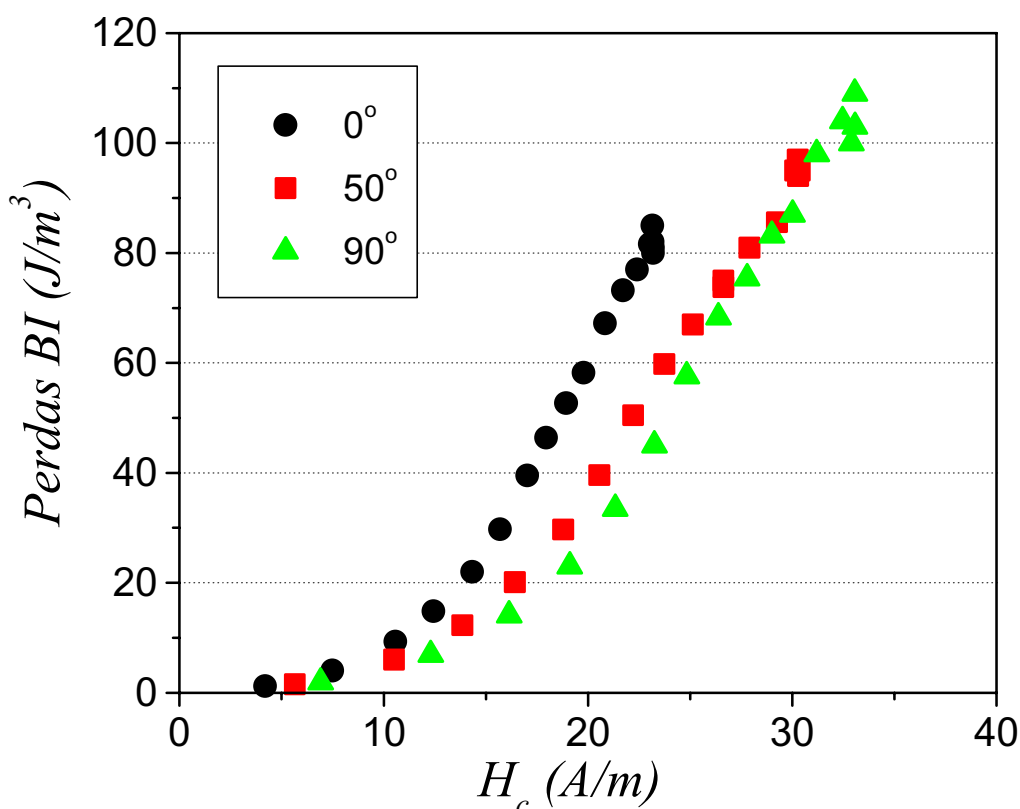
Figura 6. Comportamento do campo coercivo em função da indução máxima, para amostras cortadas em 3 diferentes direções .



Trabalho a ser apresentado no 57 Congresso Anual da ABM  
Código 0505

O campo coercivo também cresce com o ângulo de corte, para todas as induções investigadas. Nota-se também que o campo coercivo fica constante, a partir de 1,4T. Isso mostra que a correlação entre campo coercivo e perdas, freqüentemente citada na literatura (11), deixa de ser válida em altas induções. Os mecanismos que governam a coercividade não dão conta da evolução das perdas.

O componente de perdas de baixas induções tem comportamento semelhante ao do campo coercivo e da remanência, deixando de crescer a 1,4T, para as três direções. Isso indica que o segundo e o quarto quadrantes da curva de histerese, região dominada pela movimentação das paredes de domínio, deixa de influenciar a evolução das perdas acima desse valor.



**Figura 7. Relação entre campo coercivo e perdas histeréticas em baixas induções.**

A figura 7 mostra que existe uma região de correlação linear entre campo coercivo e componentes de baixas induções das perdas histeréticas. Essa relação vale para induções entre 0,5 e 1,5T. Entretanto, a Figura 7 também mostra que a relação entre campo coercivo e perdas varia muito com a direção de magnetização. Para um campo coercivo constante, o valor das perdas

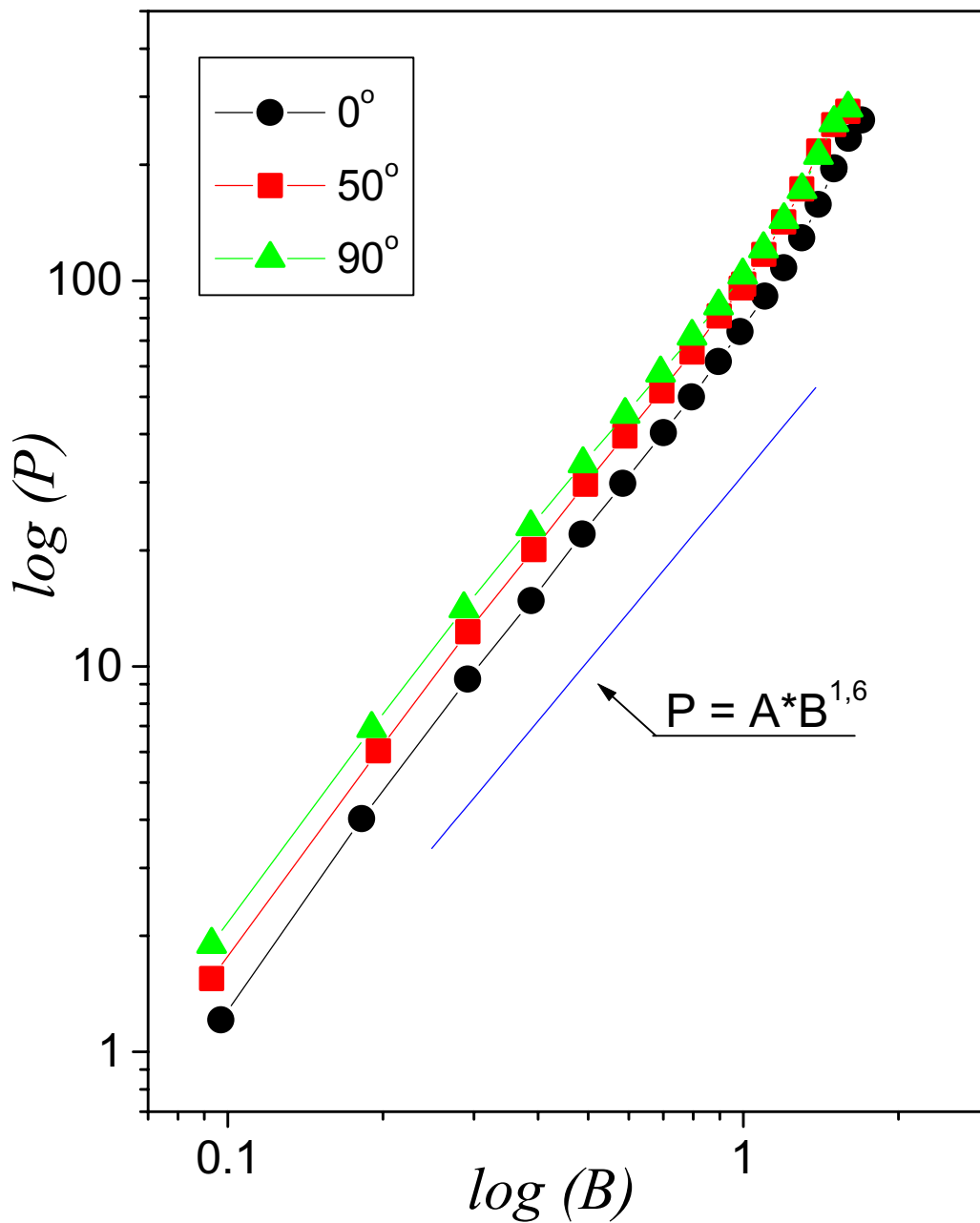
Trabalho a ser apresentado no 57 Congresso Anual da ABM  
Código 0505

histeréticas varia muito, pois cada valor de  $H_c$  foi alcançado com diferentes induções máximas.

A análise da variação das perdas histeréticas com a indução máxima confirma a existência de região exponencial nítida (com  $R^2$  maior que 0,999 e diferença percentual entre calculado e experimental menor que 3%), entre 0,3 e 1,2T, para os três ângulos de corte, como mostra a Figura 8. Os coeficientes exponenciais obtidos foram de 1,73, 1,71 e 1,60, para os ângulos de corte de 0, 50 e 90°. Baseado nos dados de Bertotti e outros (12), pôde-se constatar comportamento similar e coeficiente exponencial de 1,67 para 0° e 1,59 para 90°. Baseado nesses dados pode-se dizer que existe uma anisotropia no coeficiente de Steinmetz, mas ela não é determinada pela textura, pois decresce continuamente com o ângulo. As perdas histeréticas, acima de 1,1T, crescem mais intensamente do que o previsto por essa equação exponencial. A 1,2T elas são 3 a 4% maiores que o calculado pela equação. A 1,5T elas são 22% maiores, para as três direções. Note-se que os coeficientes exponenciais obtidos experimentalmente fogem ligeiramente do valor de 1,6 sistematicamente encontrado por Steinmetz. A título de curiosidade, os melhores materiais ensaiados por ele ("Norway steel" e "soft Bessemer steel") apresentavam perdas de 1100J/m<sup>3</sup> a 1,5T.

O campo coercivo também apresenta uma variação exponencial nítida, nessa região de induções, com expoentes entre 0,43 e 0,52. Um modelo que previsse a variação do campo coercivo com a raiz quadrada da indução máxima traria uma contribuição importante para o modelamento das perdas. Sendo as perdas histeréticas exatamente a área da curva de histerese, se transformarmos a curva de histerese num retângulo com altura  $2*B_{max}$  e largura  $2*H_c$ , procedimento usado por Bertotti, o crescimento das perdas com  $B_{max}$  chegaria a um expoente aproximadamente 1,5.

O componente de perdas de altas induções também cresce exponencialmente, entre 0,9 e 1,3T, com expoente da ordem de 4,5.



**Figura 8. Variação logarítmica das perdas histeréticas em função da indução máxima, para as 3 direções de aplicação de campo.**

É interessante notar que a existência de um coeficiente exponencial da lei de Steinmetz chama a atenção desde sua primeira divulgação. Na abertura de seu trabalho Steinmetz comenta que, "enquanto a curva de magnetização desafia todas as tentativas de formulação matemática até agora, parece uma estranha

Trabalho a ser apresentado no 57 Congresso Anual da ABM  
Código 0505

característica que o fenômeno muito mais intrincado da histerese conceda a uma formulação analítica tão simples". Na discussão que seguiu a seu trabalho, apresentada no mesmo número da revista, A.E. Kennelly comenta que "talvez seja preferível exprimir o coeficiente como uma fração ( $P = \eta B^{8/5}$ ), em vez de um decimal - não que isso altere os fatos, mas meramente por dar-nos um pouco mais de esperança de sermos capazes de entender o que essa equação significa, se não agora, pelo menos no futuro". Cento e dez anos se passaram, a curva de magnetização ainda desafia a formulação matemática e ainda não temos um modelo explicativo para o coeficiente exponencial da histerese.

#### 4. Conclusões

As perdas histeréticas crescem com a indução máxima. Existe anisotropia nesse efeito, mas é complexa: até 1,2T as perdas na amostra cortada a 90° são maiores que as outras, mas entre 1,3 e 1,6T as perdas na amostra cortada a 50° são as maiores.

Esse comportamento fica mais claro quando se subdividem as perdas: no componente de baixas induções a amostra a 90° tem sempre as maiores perdas; no componente de altas induções a amostra a 50° tem sempre as maiores perdas. Isso confirma que a textura só domina o comportamento do componente de altas induções.

Entre 0,3 e 1,2T, o crescimento das perdas histeréticas pode ser descrito por uma curva exponencial. Existe uma pequena anisotropia nos coeficientes exponenciais, mas não é possível dizer que haja anisotropia no limite de validade da lei exponencial. A citada anisotropia não deve ser atribuída à textura cristalográfica, pois o valor do expoente varia monotonicamente com o ângulo de corte.

A diferença de comportamento entre os componentes de perdas de baixa e de alta indução indicam que eles são variáveis independentes.

#### Referências bibliográficas

1. Landgraf, F.J.G; Emura, M.; Teixeira, J.C.; de Campos, M.F.; Muranaka, C.S. *Efeito do tamanho de grão em diferentes componentes das perdas magnéticas de aços elétricos*. Anais do V SEMEL, CD-ROM, p.766-773, 1998.
2. Landgraf, F.J.G.; Emura, M.; Teixeira, J .C.; de Campos, M.F.; Muranaka C.S *Anisotropy of the magnetic losses componentes in semi-processed electrical steels*. J. Mag. Mat. 196-197 (1999) 380-381
3. Bertotti G. *Hysteresis in Magnetism*, Academic Press, New York, 1998, p. 320.
4. .Makar J.M, Tanner B.K.The in situ measurement of the effect of plastic deformation on the magnetic properties. JMMM 184 (1998) 193-208

Trabalho a ser apresentado no 57 Congresso Anual da ABM  
Código 0505

5. Emura, M. de Campos, M.F. Landgraf, F.J.G.. Teixeira J.C *Angular Dependence of Magnetic Properties of 2% Silicon electrical Steel*. J.Mag.Mag.Mat., 226-230 (2001) 1524-1526
6. CUNHA, M.A.; LUNA, P.C.; Textura e anisotropia do aço silício Anais do 55 Congresso da ABM, p. 1506-1510, S.Paulo, ABM, 2000
7. Steinmetz C.P. On the law of hysteresis. Transactions AIEE, v.9, 1892, p.3-64
8. BOZORTH, R. M. Ferromagnetism Van Nostrand (livro), 1951
9. BAN, G.; BERTOTTI, G. Dependence on Peak Induction and Grain Size of Power Losses in Nonoriented SiFe Steels. J. Appl. Phys., v. 64, p. 5361-5363 1988
10. Landgraf, F.J.G. Yonamine, T. Emura, M. Cunha M.A. *Modelamento da anisotropia de propriedades magnéticas de aços siliciosos totalmente processados* Anais do 56 Congresso da ABM [CDROM]/ Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2001 p. 1612-1620.
11. Metals Handbook v.3, 8<sup>th</sup> edition
12. BERTOTTI, G.; BAN, G.; ABBRUZZESE, G. Texture Dependence of Power Losses in Nonoriented Si Fe Electrical Steels. J. Appl. Phys., v.73, p. 6612-6614 1993

Trabalho a ser apresentado no 57 Congresso Anual da ABM  
Código 0505

## **EFFECT OF MAXIMUM INDUCTION ON THE MAGNETIC PROPERTIES OF 3%Si STEEL**

Marilia Emura<sup>1</sup>  
Fernando José Gomes Landgraf<sup>2</sup>

### **ABSTRACT**

The hysteresis loss grows exponentially with maximum induction, as stated by Steinmetz' Law. This paper shows that this behavior presents differences of exponent value, depending on the direction in which magnetic field is applied, related to the rolling direction. The subdivision of the hysteresis losses shows that the high induction loss component is dominated by texture, differently from the low induction loss component.

Key words: electrical steel; peak induction; hysteresis losses.