

# O EFEITO DA INDUÇÃO MAGNÉTICA SOBRE A EQUAÇÃO DE DEPENDÊNCIA ENTRE PERDA HISTERÉTICA E TAMANHO DE GRÃO<sup>1</sup>

Daniel Luiz Rodrigues Junior<sup>2</sup>  
João Ricardo Filipini da Silveira<sup>3</sup>  
Fernando José Gomes Landgraf<sup>4</sup>  
Eric Seiji Yamasaki<sup>5</sup>  
Guilherme Daisuke Sato<sup>6</sup>

## Resumo

Este trabalho discute o efeito da indução máxima sobre a relação entre tamanho de grão e energia dissipada por histerese em aço elétrico. A partir de uma chapa de aço elétrico 0,7% Si foram obtidos conjuntos de amostras com diferentes tamanhos de grão, na faixa entre 10 a 150 $\mu$ m. Os tamanhos de grão foram medidos pelo método dos interceptos. A caracterização magnética foi executada em regime quase estático a 5mHz para diversos valores de indução máxima. Os resultados mostram que a indução máxima afeta o coeficiente linear e a inclinação da reta definida pelo gráfico da energia dissipada por histerese em função do inverso do tamanho de grão.

**Palavras-chave:** Aço elétrico; Perdas magnéticas; Indução máxima; Tamanho de grão.

## THE EFFECT OF THE MAGNETIC INDUCTION UPON THE DEPENDENCE EQUATION BETWEEN HYSTERESIS LOSS AND GRAIN SIZE

## Abstract

This paper discusses the effect of maximum induction upon the relation between grain size and hysteresis losses in electrical steels. Starting from a 0,7%Si electrical steel sheet, sets of samples with different grain sizes in the range between 10 to 150 $\mu$ m were obtained. Grain sizes were measured by the method of intercept. Magnetic characterization was performed under quasi-static regime at 5mHz for various values of maximum induction. The results show that the maximal induction affects both the linear coefficient and the slope defined by the graph of energy dissipated by hysteresis as a function of inverse grain size.

**Key words:** Electrical steel; Magnetic losses; Maximum induction; Grain size.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

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

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

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

<sup>5</sup> Graduando em Engenharia Metalúrgica – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica, Universidade São Paulo – USP.

<sup>6</sup> Graduando em Engenharia Metalúrgica – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica, Universidade São Paulo – USP.

## 1 INTRODUÇÃO

Aços elétricos de grão não-orientado são materiais de elevado valor agregado cuja aplicação se dá principalmente na construção de motores elétricos. No entanto, durante o processo de magnetização e desmagnetização ao qual são submetidos esses aços durante o uso parte da energia fornecida é dissipada no aço devido a características microestruturais e geométricas.<sup>1</sup>

Dentre os fatores microestruturais que influenciam o rendimento energético dessa classe de materiais pode-se citar o tamanho de grão. Publicado por T. D. Yensen<sup>2</sup> em 1939, o artigo *Magnetically Soft Materials* descreve a evolução da perda histerética, medida à indução máxima de 1T, em função do tamanho de grão para o ferro puro.

A partir dos dados de Yensen, Landgraf<sup>1</sup> construiu uma equação para descrever a relação entre energia dissipada por histerese e o tamanho e grão (Equação 1).

$$Wh = \frac{8,8}{d} \quad \text{Equação 1}$$

onde Wh é a energia dissipada por histerese e d é o tamanho de grão.

Os experimentos de Yensen, no entanto, foram conduzidos apenas para indução máxima de 1T impedindo uma análise da influência dessa variável sobre a relação entre energia dissipada por histerese e tamanho de grão.

Ainda em 1892, Steinmetz<sup>3</sup> publicou artigo onde ele relaciona a energia dissipada por histerese à indução máxima. Através de seus experimentos o autor propôs uma equação estimar a energia dissipada por histerese em função da indução máxima.

$$W_h = k \times B^q \quad \text{Equação 2}$$

Infelizmente, o trabalho de Steinmetz não discute características microestruturais como o tamanho de grão, porém a simplicidade dessa equação faz com que ainda hoje muitos fabricantes de motores a utilizem.

Diante dos dados apresentados, é objetivo deste trabalho estabelecer uma ligação entre os experimentos de Yensen e Steinmetz e construir uma equação que através do tamanho de grão e da indução máxima possa descrever o comportamento da energia dissipada por histerese.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Produção de Amostras com Diferentes Tamanhos de Grão

O material a ser analisado foi o aço elétrico de grão não-orientado COS CORE 260, gentilmente cedido pela Cosipa, cuja composição é descrita pela Tabela 1. As amostras foram extraídas de uma única bobina. O processo de produ-

ção do COS CORE 260 consiste na solidificação através de lingotamento contínuo com espessura de 250 mm. Por laminação á quente a espessura é reduzida até 2,3 mm. Por fim o aço é laminado a frio até 0,54 mm e recozido a 640°C. Este material foi recebido na forma de chapas nas dimensões 1X0,7m.

**Tabela 1:** Composição química do COS CORE 260

C	Mn	P	S	Si	Cu	Al	B	Nb	V	Ti	Mo	Ni	Cr
24ppm	0,5	0,016	0,0086	0,69	0,066	0,312	1ppm	0,0024	0,013	0,001	0,056	0,0108	0,025

Para a obtenção de amostras com diferentes tamanhos de grão foram escolhidos dois processos distintos de aumento de tamanho de grão: recristalização e crescimento.

O procedimento de aumento de tamanho de grão por recristalização consiste em fornecer deformação plástica ao material e, em seguida, submetê-lo a tratamento térmico, etapa onde ocorre a recristalização. Pode-se controlar o tamanho de grão ao término da recristalização através do grau de deformação fornecido às chapas. Assim, para produção de amostras com diferentes tamanhos de grãos, o material foi laminado a frio produzindo chapas com diferentes graus de deformação.

O material antes de laminado foi cortado com o uso de uma guilhotina em chapas menores para que elas se ajustassem às dimensões do laminador. Essas chapas foram laminadas mantendo seu comprimento paralelo à direção de laminação do material como recebido.

O controle desta etapa foi realizado através da medição da espessura do material laminado. Isso permitiu o cálculo da deformação real das chapas, critério utilizado para que estas fossem agrupadas em conjuntos. As chapas passaram então por nova etapa de corte para a obtenção de lâminas padronizadas com as dimensões exigidas para o ensaio Epstein, 300x30mm.

Foram produzidos sete conjuntos contendo oito lâminas cada. A Tabela 2 traz informações sobre o grau de deformação de cada conjunto. Durante a operação de corte foram guardados, para cada conjunto, retalhos de aço que apresentavam o mesmo grau de deformação para posterior caracterização microestrutural. Esses conjuntos, juntamente com seus retalhos foram enviados à empresa SEW Eurodrive que, gentilmente, executou o recozimento das amostras. O processo de recozimento inclui aquecimento por 4 horas, manutenção no patamar a 760° C por 2 horas sob atmosfera levemente oxidante, resfriamento lento até 540°C, patamar nesta temperatura por 1 hora sob atmosfera oxidante para a produção de uma camada de magnetita que protege contra corrosão.

**Tabela 2:** Deformação real e espessura dos conjuntos de amostras após laminação

Espessura (µm)	343	400	451	475	488	501	511
Deformação Real (%)	46	30	18	13	10	8	6

Para o procedimento de aumento do tamanho de grão por crescimento o material como recebido foi inicialmente cortado em lâminas com dimensões exigidas para o ensaio em quadro de Epstein. Para cada um desses conjuntos também foram guardados retalhos. Essas chapas foram agrupadas em conjuntos contendo

oito lâminas cada. Um desses conjuntos foi submetido a recozimento na empresa SEW Eurodrive e submetidos ao mesmo tratamento térmico já descrito para as amostras laminadas. Os outros quatro conjuntos foram levados à empresa Embraco, onde também foram realizados tratamentos térmicos. Um conjunto foi submetido a recozimento por duas horas a 600°C. Este tratamento não visa crescimento de grãos (visto que a essa temperatura o crescimento de grão é muito lento) e sim promover alívio das tensões introduzidas pelo material na etapa de corte preservando a estrutura de grãos semelhante a do material como recebido. Pelo mesmo período de recozimento, porém a uma temperatura de 680°C, foi produzido um segundo conjunto de amostras. Os dois conjuntos restantes foram submetidos a tratamento térmico a 850°C, sendo um conjunto por quatro e o outro por oito horas.

## 2.2 Caracterização Microestrutural

A caracterização microestrutural consistiu na determinação do tamanho de grão médio através de metalografia. Os retalhos correspondentes a cada conjunto foram embutidos em baquelite e a preparação metalográfica foi executada no plano paralelo à superfície dos corpos de prova. Estes foram então lixados e polidos. Para que a microestrutura fosse revelada, a superfície das amostras foi atacada quimicamente com uso do reagente Nital 3%. A extração das fotos foi realizada em microscópio óptico seguindo o procedimento descrito pela norma ASTM que recomenda extração de no mínimo 10 campos escolhidos ao acaso, com no mínimo 50 grãos em cada, em amostras de aproximadamente 1 polegada quadrada de superfície.

Para a aferição do tamanho de grão foi escolhido o método dos interceptos. Para isso, foram sobrepostas às micrografias circunferências de diâmetro conhecido usadas como linhas-testes. A contagem dos interceptos, pontos onde a linha-teste é interceptada um contorno de grão, seguiu e o procedimento descrito pela norma ASTM. Caso a linha intercepte um ponto triplo, ponto de encontro entre os contornos de três grãos adjacentes, é contado 1,5 ocorrências. Assim determinou-se um tamanho de grão médio para cada campo através da razão entre o comprimento da linha-teste e a soma das ocorrências. A média entre os TGs obtidos pelo método dos interceptos para os campos de uma amostra constituiu seu tamanho de grão que aqui será chamado de  $\ell$ .

## 2.3 Medidas Magnéticas

As medidas magnéticas foram realizadas no Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. O equipamento usado para efetuar essas medições foi um Quadro de Epstein. Foram medidas as perdas histeréticas em ensaio quase-estático (a uma frequência de 0,5mHz). Para esse ensaio os valores de indução máxima foram 0,6 T; 0,8 T; 1,0 T; 1,2 T; 1,4 T e 1,5 T. A partir dos valores de perda histerética foi possível calcular, para cada ensaio, o valor da energia dissipada por histerese ( $Wh$ ) através da Equação 3, onde  $Ph$  é a perda histerética (cujo valor é extraído diretamente no ensaio quase estático),  $d$  é a densidade e  $f$  é a frequência.

$$Wh = \frac{Ph \times d}{f} \quad \text{Equação 3}$$

De posse desses dados, foram plotados gráficos que descrevem o comportamento da energia dissipada por histerese em função do tamanho de grão e da indução máxima.

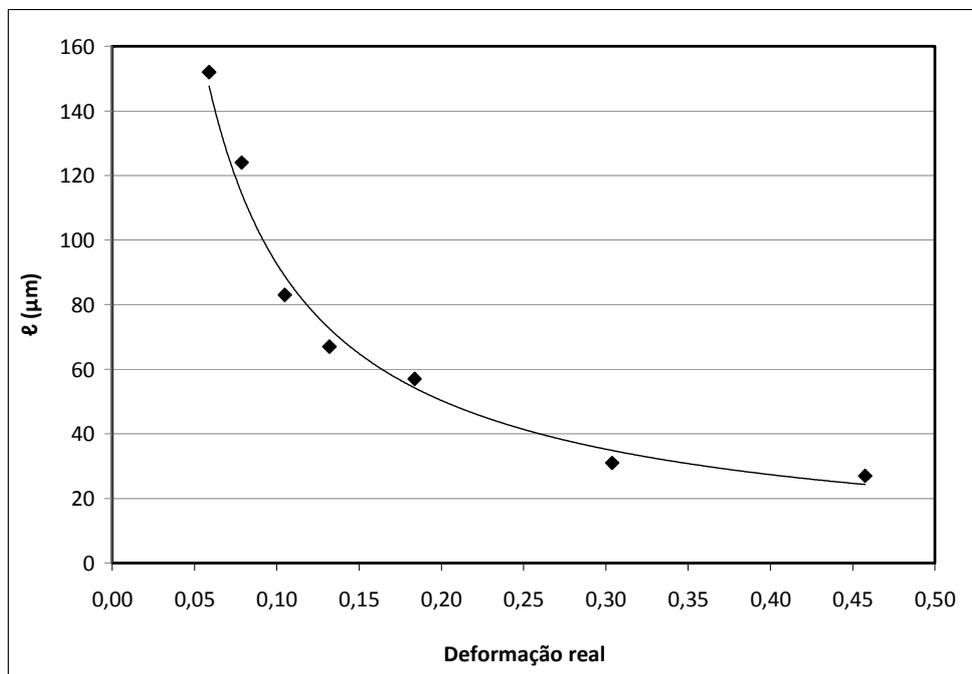
### 3 RESULTADOS

Os resultados referentes às amostras submetidas a aumento do tamanho de grão por recristalização são listados na Tabela 3.

**Tabela 3:** Tamanho de grão após recozimento das amostras submetidas a aumento do tamanho de grão por crescimento

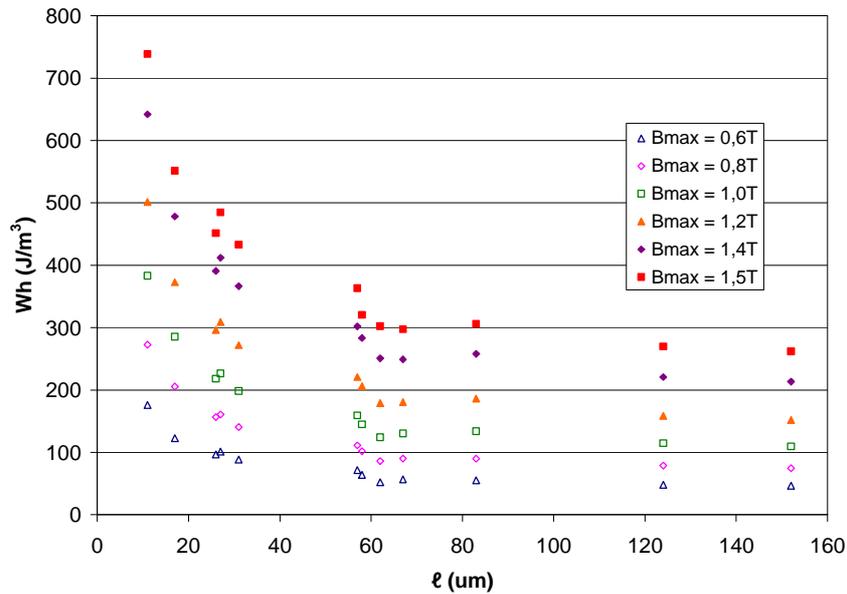
Temperatura de recozimento (°C)	600	680	760	850	850
Tempo de recozimento (h)	2	2	2	4	8
<b>Tamanho de grão após recozimento <math>l</math> (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>11</b>	<b>17</b>	<b>26</b>	<b>58</b>	<b>62</b>

O gráfico a seguir (Figura 1) traz a curva de recristalização do material laminado e recozido. Nele é mostrado o tamanho de grão recristalizado como função da quantidade de deformação.



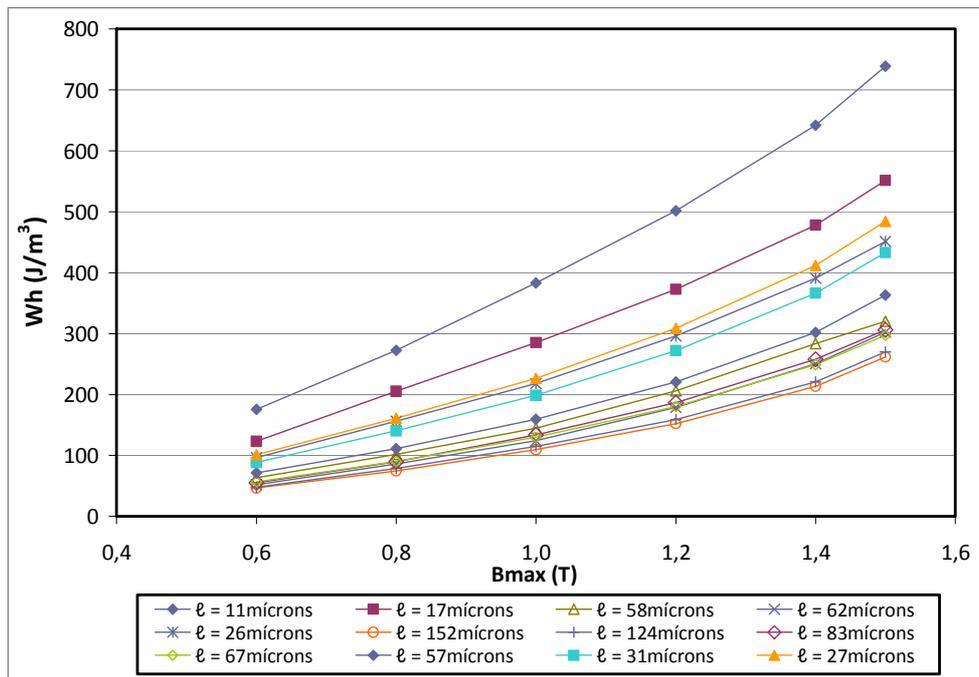
**Figura 1:** Curva de recristalização do material laminado a frio e recozido.

O gráfico da Figura 2 mostra o comportamento da energia dissipada por histerese em função do tamanho de grão para cada valor de indução máxima.



**Figura 2:** Gráfico da energia dissipada por histerese em função do tamanho de grão.

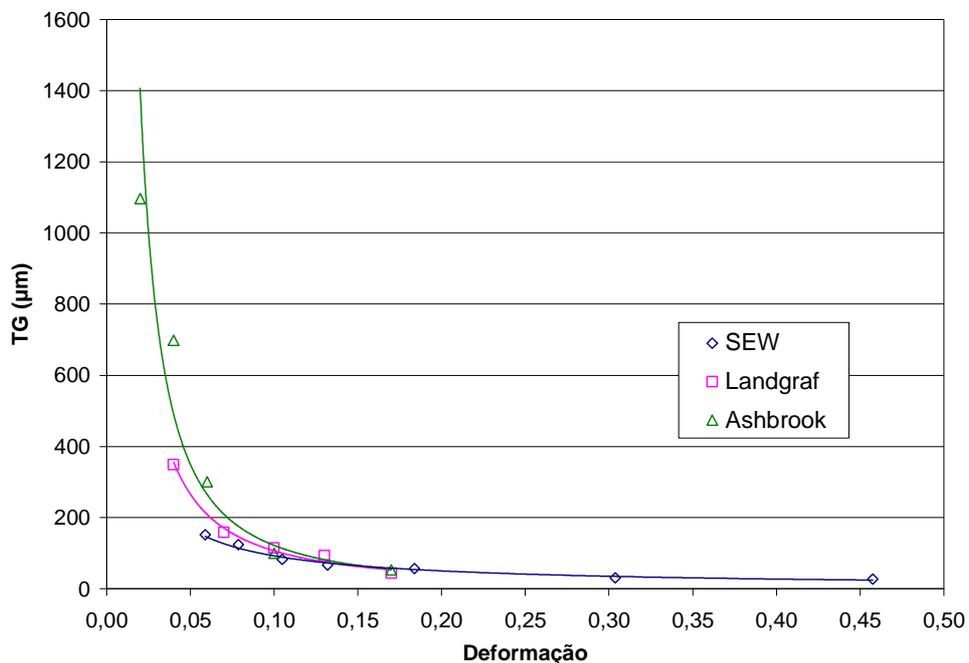
A evolução da energia dissipada por histerese com a indução máxima para cada uma das amostras é mostrada no gráfico da Figura 3.



**Figura 3:** Energia dissipada por histerese ( $W_h$ ) em função da indução máxima ( $B$ ) para amostras com diferentes tamanhos de grão para valores de  $B$  entre 0,6 T e 1,5 T.

## 4 DISCUSSÃO

A Figura 4 compara os resultados da Figura 1 (aqui chamados de SEW) com os resultados divulgados por Ashbrook<sup>5</sup> e Landgraf.<sup>6</sup> Nota-se que todos os resultados apresentam-se de maneira a seguir o comportamento previsto por Burke e Turnbull,<sup>4</sup> ou seja, ou seja, menores graus de deformação proporcionam maiores tamanhos de grão após recristalização. Tal afirmação define a deformação como a principal variável no controle do tamanho de grão após recristalização. A figura ressalta também que, para deformações inferiores a 0,10, a variação do tamanho de grão recristalizado é mais abrupta. Isso fica nítido ao se observar a curva obtida por Ashbrook em deformações inferiores a 0,10.



**Figura 4:** Curvas de recristalização com os resultados extraídos de Ashbrook, Landgraf e os obtidos no processo de aumento de tamanho de grão por recristalização (indicados por SEW).

A energia dissipada por ciclo de histerese aumenta linearmente com o inverso do tamanho de grão. Essa relação se repete para cada um dos valores de indução máxima analisada conforme mostram os pontos experimentais e as retas de ajuste da Figura 5.

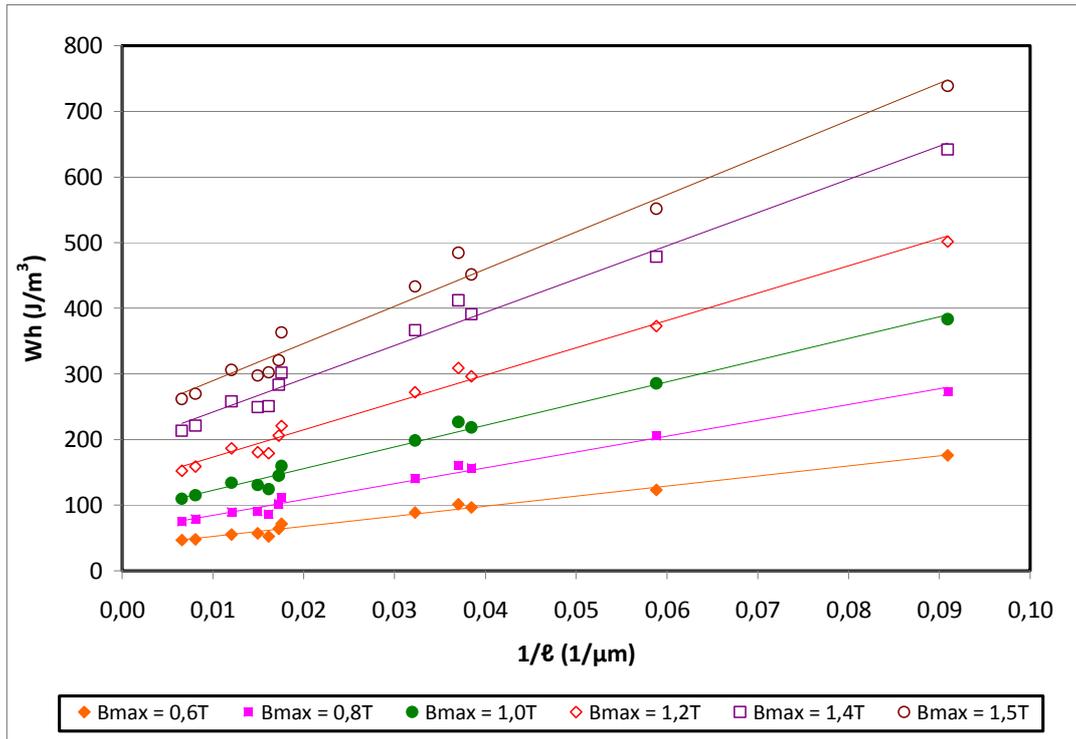
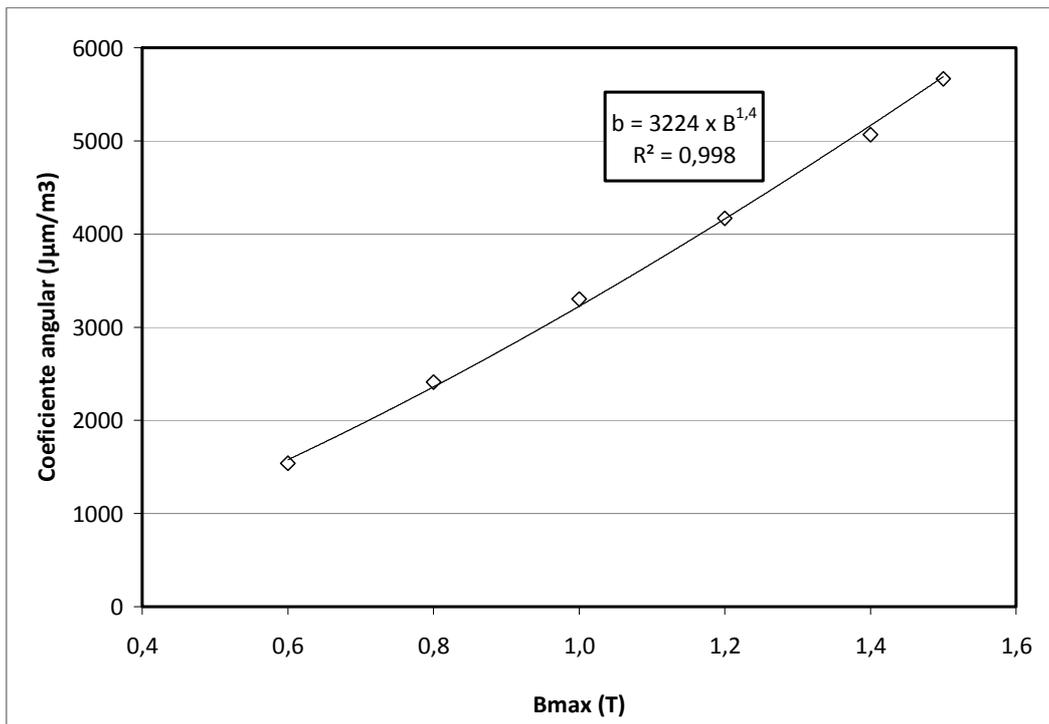


Figura 5: Gráfico Wh x 1/l para as induções máximas de 0,6 T; 0,8 T; 1,0 T; 1,2 T; 1,4 T e 1,5T.

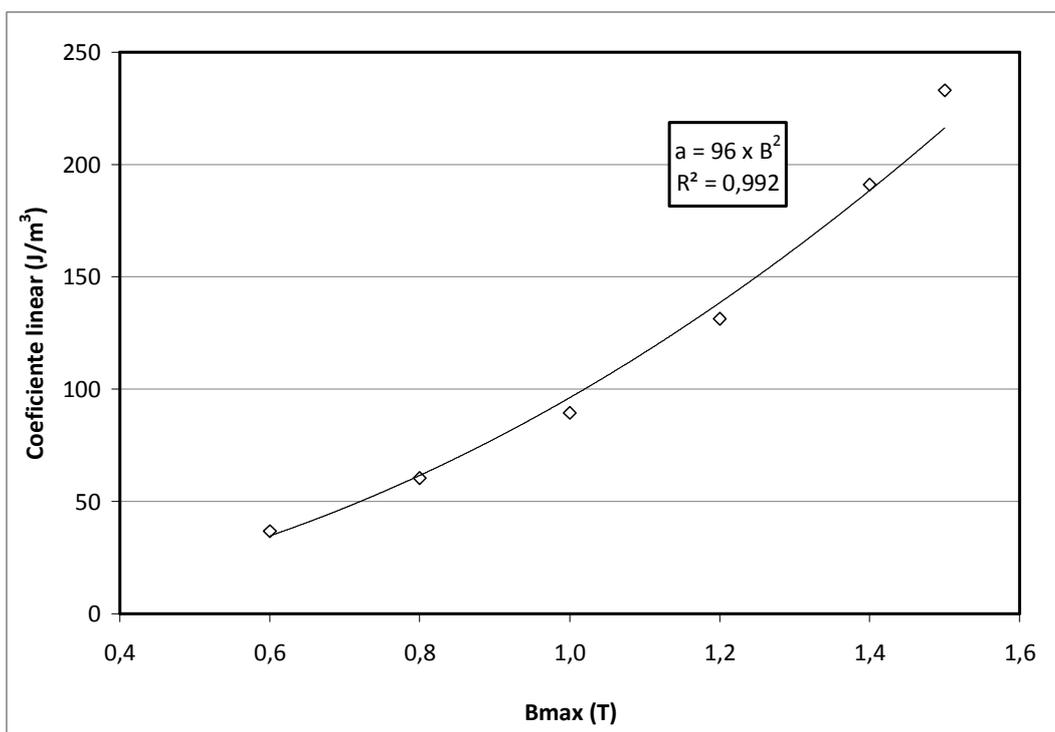
Os coeficientes lineares e angulares, bem como os índices de determinação das retas da Figura 5 estão listados na Tabela 4 e mostram que os coeficientes da equação  $Wh = a + b/l$  variam com a indução máxima. Os coeficientes angular e linear aumentam com a indução máxima de acordo com uma lei de potência indicada nas Figuras 6 e 7.

Tabela 4: Coeficientes lineares e angulares e índices de determinação para as retas  $Wh \propto 1/l$  em diversos valores de indução máxima

B (T)	Wh = a + b/l		
	a	b	R2
0,6	36,7	1538	0,985
0,8	60,3	2412	0,988
1,0	89,4	3303	0,989
1,2	131,3	4169	0,987
1,4	191,1	5068	0,983
1,5	233,0	5667	0,979



**Figura 6:** Gráfico do coeficiente angular da reta  $Wh \times 1/l$  em função da indução máxima.



**Figura 7:** Gráfico do coeficiente linear da reta  $Wh \times 1/l$  em função da indução máxima.

Analisando-se os gráficos que trazem os coeficientes linear e angular em função da máxima indução e somando-se esses dados á reta  $Wh \times 1/l$  é possível

construir uma equação que relacione a energia dissipada por histerese ao tamanho de grão e à indução máxima. Os resultados obtidos aqui levam à Equação 4.

$$Wh = 96 \times B^2 + \frac{3237 \times B^{1,4}}{\ell} \quad \text{Equação 4}$$

## 5 CONCLUSÕES

A curva de recristalização aqui apresentada segue de maneira geral o que é previsto pela literatura. Ressaltando a importância da quantidade de deformação como variável de controle da estrutura de grãos de um material após recristalização.

A energia dissipada por histerese aumenta linearmente com o inverso do tamanho de grão para todos os valores de indução máxima analisados. Sobre essas retas nota-se que a indução máxima exerce forte influência sobre os coeficientes lineares e angulares tornando possível a determinação de uma equação que inclua o efeito da indução máxima na relação entre energia dissipada por histerese e tamanho de grão.

## Agradecimentos

- Cosipa;
- Embraco;
- Sew Eurodrive;
- D.L. Rodrigues-Jr, J.R.F. Silveira e F.J.G. Landgraf agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pelo apoio financeiro.

## REFERÊNCIAS

- 1 LANDGRAF, F. J. G., “Microestrutura e histerese magnética nos aços para fins eletromagnéticos”, 2007. 117p. Tese (Livre Docência), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- 2 YENSEN, T. D., “Magnetically soft materials”, Transactions of the A.S.M. p.796-820, Sep. 1939.
- 3 STEINMETZ, C. P.: “On the law of Hysteresis”. Transactions AIEE, v.9, 1892.
- 4 BURKE, J. E.; TURNBULL, D.: “Recrystallization and grain growth”. Progress in Metal Physics. Pergamon Press, vol. 3. Londres 1952.
- 5 ASHBROOK, R. W. Jr.; MARDER, A. R.: “The effect of initial carbide morphology on abnormal grain growth in decarburized low carbon steel”. Metallurgical Transactions, vol. 16A.
- 6 LANDGRAF, F. J. G.; EMURA, M.; TEIXEIRA, J.C.; de CAMPOS, M. F.; MURANAKA, C.S.: “Anisotropy of the magnetic losses in semi-processed electrical steels”. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 196-197 (1999) 380-38t.