

# O EFEITO DO TAMANHO DE GRÃO SOBRE AS PERDAS MAGNÉTICAS EM AÇOS ELÉTRICOS<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>5</sup>

## Resumo

Este trabalho discute o efeito do tamanho de grão sobre o campo coercivo e perdas magnéticas em aços elétricos. 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 200µm. Os tamanhos de grão foram medidos por um método de análise semi-automático envolvendo a medição das áreas dos grãos individuais e também pelo método dos interceptos. A caracterização magnética foi executada em regime quase estático e a 60Hz para 1,0 e 1,5T. Os resultados mostram uma relação de linearidade entre o campo coercivo e as perdas histeréticas com relação ao tamanho de grão.

**Palavras-chave:** Perdas magnéticas, Campo coercivo, Tamanho de grão.

## THE EFFECT OF THE GRAIN SIZE ON THE MAGNETICS LOSSES IN ELECTRIC STEEL

### Abstract

This paper discusses the effect of grain size on the coercive field and magnetic 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 200µm were obtained. Grain sizes were measured by a semi-automatic of analysis method involving a measurement of individual grains and also by the method of intercept. Magnetic characterization was performed under quasi-static regime and at 60Hz to 1.0 and 1.5 T. The results show a linear relation between both the coercive field and losses hysteretic with respect to grain size.

**Key words:** Magnetic losses, Coercive field, Grain size.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 64° Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Aluno Pós-graduando – 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.

# 1 INTRODUÇÃO

Aços para fins elétricos são materiais magneticamente moles usados na confecção de dispositivos tais como núcleos de transformadores e motores elétricos. Essa aplicação se deve à elevada capacidade de amplificar o campo magnético ao qual são submetidos.

No entanto, em aplicações em corrente alternada, parte da energia fornecida pela passagem de corrente elétrica é dissipada no aço durante o seu uso devido a características microestruturais e geométricas recebendo o nome de “perdas magnéticas”.<sup>(1)</sup> As perdas estão associadas ao campo coercivo, o campo necessário para desmagnetizar o material.

A busca pela maior eficiência dos equipamentos elétricos torna importante o conhecimento dos mecanismos de dissipação de energia. Portanto, pesquisadores têm estudado como o controle de características microestruturais pode elevar o desempenho de dispositivos elétricos. Dentre essas características merece destaque o tamanho de grão.

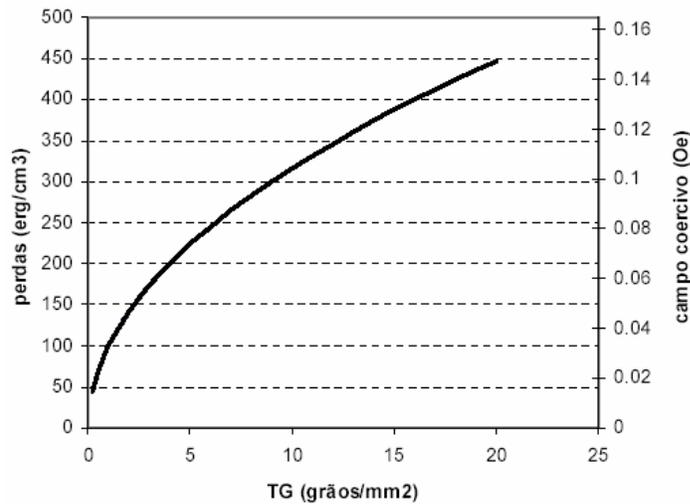
Publicado por Yensen<sup>(2)</sup> em 1939, o artigo *Magnetically Soft Materials* apresenta uma figura que descreve a evolução da perda histerética, medida à indução máxima de 1T, em função do tamanho de grão para o ferro puro (Figura 1). O gráfico indica redução no valor das perdas conforme o tamanho de grão é aumentado. Esta figura não apresenta pontos experimentais e o procedimento usado para a obtenção desse resultado também não é descrito no artigo. Desta forma, não se sabe qual o erro experimental envolvido na determinação da relação de raiz quadrada entre o número de grãos por unidade de área e o campo coercivo proposta pelo autor.

Utilizando o fator de conversão oferecido pela norma ASTM E 112,<sup>(3)</sup> esta passa a ser uma relação linear entre o campo coercivo  $H_c$  e o inverso do intercepto médio, ou seja,  $H_c \propto 1/d$ .

Degauque<sup>(4)</sup> encontrou uma relação linear entre o campo coercivo e o inverso do tamanho de grão, porém os dois últimos pontos (correspondentes à região de grãos pequenos) não se ajustam à reta. O autor afirma que incertezas experimentais podem fazer com que a lei  $1/d$  não seja a única possível para descrever o comportamento de  $H_c$ . Ele conclui que uma lei  $H_c \propto 1/d^{1/2}$  não poderia ser excluída.

Analisando o comportamento magnético de um aço elétrico contendo 3% Si e 0,4% Al, Bertotti et al.<sup>(5)</sup> obtiveram como resultado uma dependência entre perdas histeréticas e tamanho de grão baseada na lei  $H_c \propto 1/d^{1/2}$  para grãos variando de 15 a 400 $\mu$ m. Esse resultado vai ao encontro da afirmação de Degauque sugerindo que a lei  $1/d$  pode não ser a única a descrever o comportamento das perdas histeréticas em relação ao tamanho de grão.

Sobre o comportamento magnético de uma liga NiFe 47,5%, Adler e Pfeiffer<sup>(6)</sup> publicaram resultados sobre o estudo da influência de impurezas e tamanho de grão sobre o campo coercivo. Para avaliar o efeito do tamanho de grão eles partiram de material sinterizado de alta pureza, submetido à laminação e recozimento, eliminando toda a porosidade. Nesse trabalho os autores concluíram que  $H_c$  varia linearmente com o inverso do tamanho de grão, ou seja,  $H_c \propto 1/d$ .



**Figura 1:** Gráfico obtido por Yensen<sup>(2)</sup> apud Landgraf<sup>(1)</sup> onde o comportamento das perdas histeréticas a 60Hz e o campo coercivo são dados em função do tamanho de grão.

Experimento semelhante foi realizado por Battistini<sup>(7)</sup> para aço inoxidável. Em seus resultados o campo coercivo também variou linearmente com  $1/d$ .

Há modelos teóricos que apontam para uma dependência linear do campo coercivo com o inverso de tamanho de grão apresentados por Mager<sup>(8)</sup> e Goodenough.<sup>(9)</sup>

Como os dados de Yensen percorrem uma faixa de tamanhos de grão muito restrita, não incluem os pontos experimentais e foram realizados há muitos anos, torna-se plausível a existência de uma dependência com o inverso da raiz quadrada, conforme obtido por Bertotti e cogitado por Degauque. Portanto é objetivo desse trabalho trazer novos dados experimentais para reavaliar o efeito do tamanho de grão sobre o campo coercivo e perdas magnéticas em aços elétricos.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Obtenção de Conjuntos de Amostras com Diferentes Tamanhos de Grãos

Neste trabalho o material sob estudo foi o aço elétrico Coscore U260, gentilmente cedido pela Cosipa, cuja composição é descrita pela Tabela 1. Todas as amostras foram extraídas de uma única bobina. O processo de produção do Coscore U260 consiste na solidificação através de lingotamento contínuo com espessura de 250mm. 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 Coscore U260.

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. Parte do material foi submetido à laminação e recozimento, o restante passou por recozimento apenas.

A etapa de laminação visa proporcionar a deformação plástica necessária para que a etapa de recristalização, ocorrida durante o recozimento, resulte em conjuntos de amostras com diferentes valores médios de tamanhos de grão. Para isso torna-se necessário a obtenção de conjuntos de amostras com diferentes graus de deformação. O material a ser 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 o 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, 300x30 mm.

Cada uma dessas lâminas teve sua espessura medida em diversos pontos para que fosse verificada a homogeneidade da deformação. As lâminas que apresentavam deformação irregular foram descartadas. Foram selecionados 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.

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

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

O mesmo processo de corte para obtenção de lâminas com 300x30 mm foi executado para o material que não passou por processo de deformação plástica. Desse material foram extraídos dois conjuntos com oito lâminas cada.

Oito conjuntos de lâminas, sete de material laminado e um do aço como recebido, foram levados até a empresa SEW para tratamento térmico. O processo 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 produzir camada de magnetita que protege contra corrosão. Os retalhos correspondentes a cada conjunto também passaram pelo mesmo tratamento.

O conjunto restante, juntamente com o seu retalho, foi enviado à empresa Embraco para a realização de um tratamento térmico para alívio de tensão que visa minimizar os efeitos do corte das amostras. Tal tratamento foi realizado a 600°C por duas horas em atmosfera composta pelos gases nitrogênio e oxigênio sem umidade.

## 2.2 Caracterização Microestrutural

A caracterização microestrutural consistiu na determinação do tamanho de grão médio através de metalografia. Outro importante objetivo dessa análise era a observação da distribuição dos tamanhos de grão.

Os retalhos correspondentes a cada conjunto foram embutidos separadamente 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 5%. O tamanho de grão médio e sua distribuição foram determinados por método de análise de imagens semi-automático utilizando micrografias da superfície das amostras. A extração das fotos seguiu o procedimento descrito pela norma ASTM<sup>(3)</sup> que recomenda no mínimo 10 campos ao acaso, com no mínimo 50 grãos em cada, em amostras de aproximadamente 1 polegada quadrada de superfície.

A análise das micrografias foi executada segundo dois métodos distintos: medida do tamanho de grãos pelo método dos interceptos e método das áreas.

O método das áreas consiste em um procedimento semi-automático que utilizou o software Altra System. Este software de processamento de imagens permite selecionar individualmente os grãos de uma micrografia e medir a área de cada um desses grãos. Cada corpo de prova foi analisado separadamente. Durante a análise apenas os grãos totalmente encompassados pela micrografia foram contabilizados.

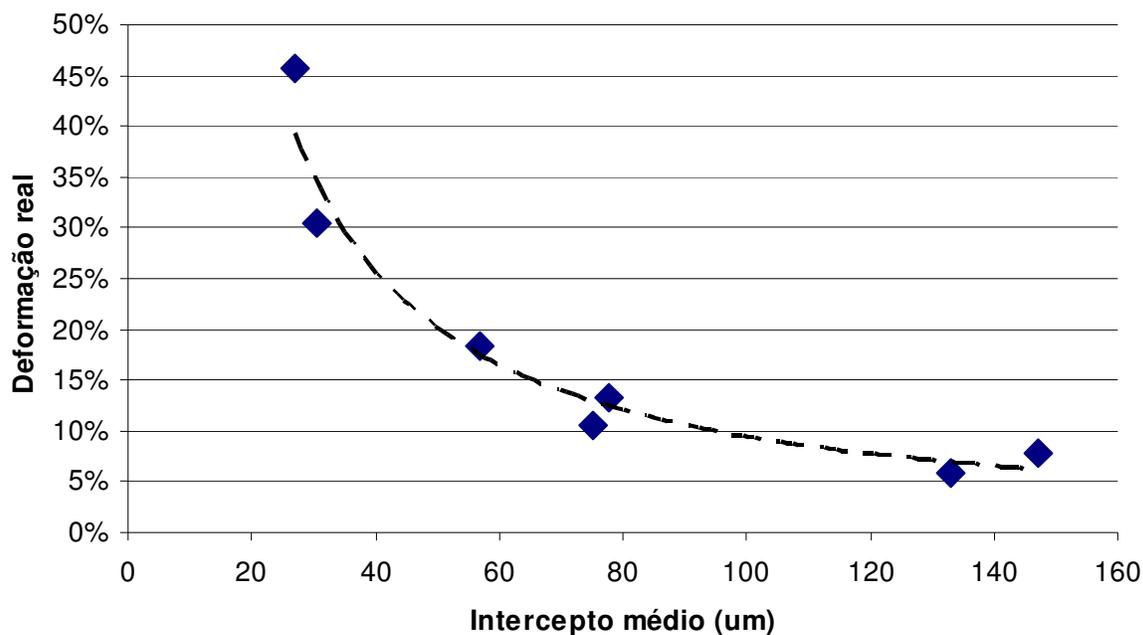
Esses dados foram organizados em uma planilha para o cálculo do diâmetro equivalente, ou seja, o diâmetro do círculo de mesma área. Para o tratamento estatístico esses dados foram divididos em classes de acordo com diâmetro equivalente. Para cada classe foi calculada a razão entre a área ocupada pelos grãos pertencentes a essa classe e a área ocupada por todos os grãos contabilizados na análise. Tal razão determina a fração de área de cada classe. A determinação do tamanho de grão se deu através da média dos diâmetros equivalentes ponderada pela fração de área. O tamanho de grão determinado pelo método das áreas será aqui chamado de  $d_A$ .

### **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) bem como as perdas totais a 60Hz, a 1,0 T e 1,5 T. De posse desses dados foram plotados gráficos que descrevem o comportamento das perdas histeréticas e perdas totais em função do tamanho de grão.

## **3 RESULTADOS**

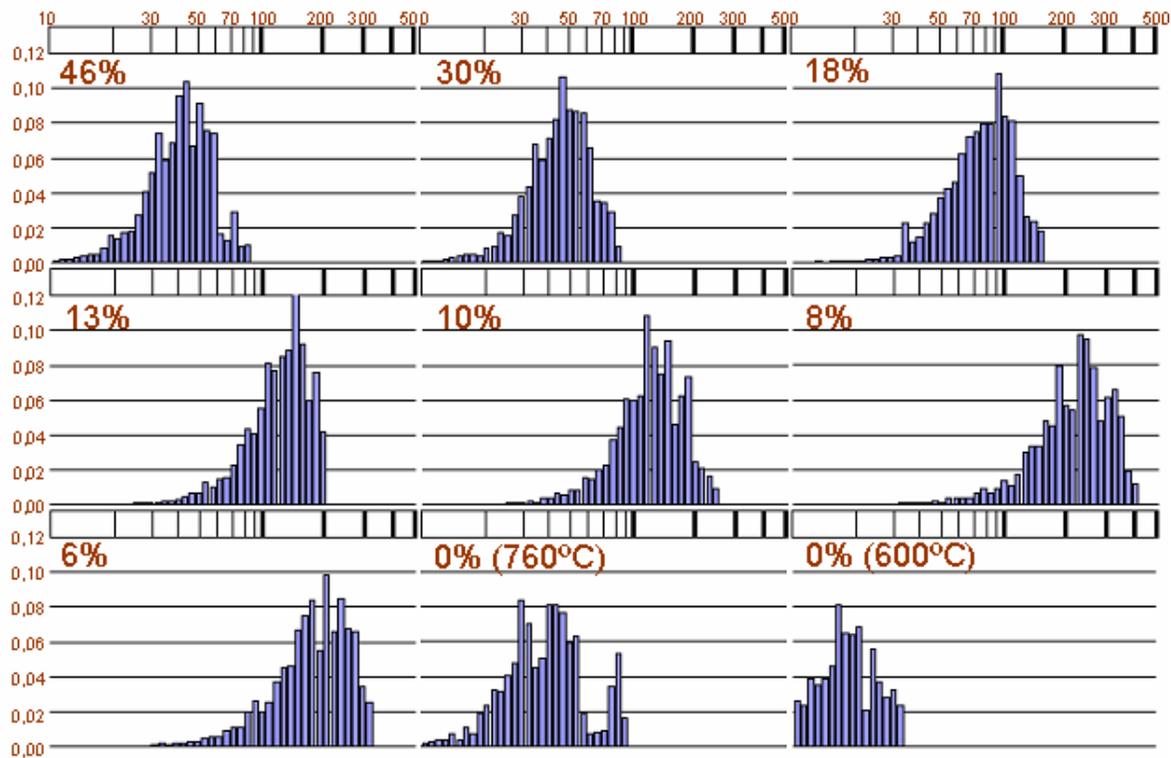
O gráfico a seguir (Figura 2) traz a curva de recristalização do material laminado e recozido. Por ela pode-se notar que menores graus de deformação resultaram em grãos maiores após tratamento.



**Figura 2:** Curva de recristalização do material laminado e recozido

A distribuição dos tamanhos de grão das amostras está descrita na Figura 3. Esses tamanhos foram divididos em classes de acordo com o diâmetro equivalente  $d_A$ . O eixo das ordenadas representa a fração de área. Os materiais recozidos a  $760^{\circ}\text{C}$  estão identificados pelo grau de deformação. A chapa que passou por tratamento térmico a  $650^{\circ}\text{C}$  para alívio de tensão está identificada por 0% ( $600^{\circ}\text{C}$ ).

É razoável supor que a distribuição de tamanho de grão dessa amostra represente a condição como-recebida, pois o crescimento de grão deve ser lento, a  $600^{\circ}\text{C}$ . A amostra 0%, que foi submetida a recozimento a  $760^{\circ}\text{C}$  por 2 h mostra, em comparação, significativo aumento da moda, além de indicar ocorrência de crescimento anormal, associado à distribuição bimodal. Os gráficos também mostram que a distribuição dos tamanhos de grão dos materiais deformados e recozidos não é lognormal.



**Figura 3:** Distribuição dos tamanhos de grão para cada um dos conjuntos de amostras. A ordenada representa classes de tamanho de grão ( $d_A$ ) organizados em escala logarítmica. A abcissa representa a fração de área de cada classe de tamanho.

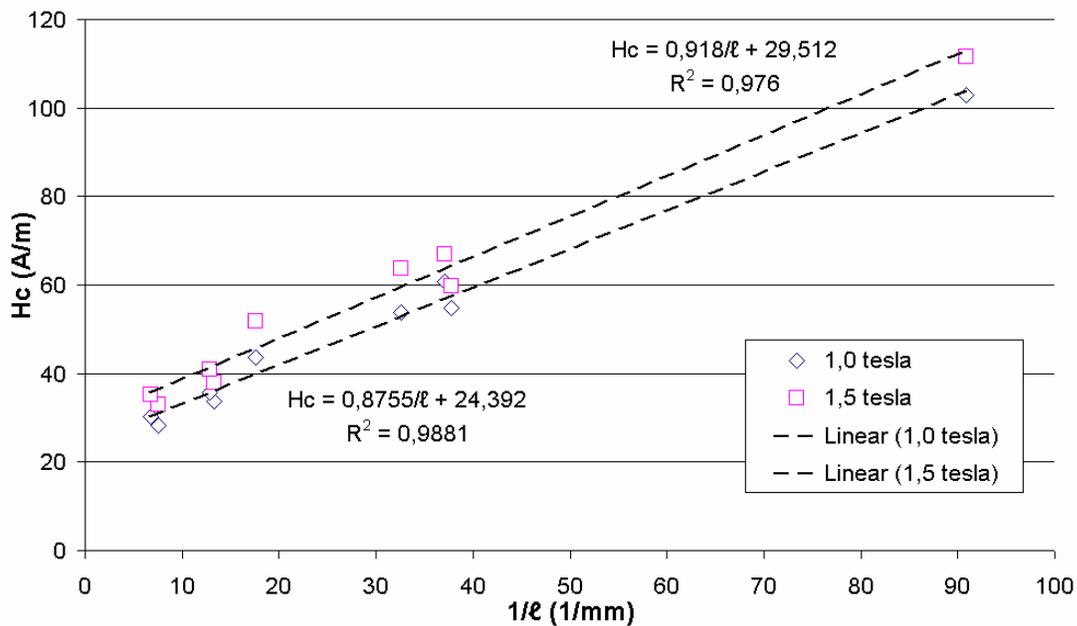
A A nomenclatura (E - 413, por exemplo) refere-se à espessura das amostras em  $\mu\text{m}$  após laminação. A amostra A - 542 é aquela que foi submetida ao tratamento térmico para alívio de tensão apenas ( $600^\circ\text{C}$ , 2h). Essa amostra não possui qualquer acréscimo em seu tamanho de grão com relação ao material como recebido.

Tabela 3 compara os tamanhos de grão determinados pelo método do intercepto e pelo método do diâmetro médio equivalente ponderado por área. Os resultados mostram que o diâmetro médio ponderado é sistematicamente maior que o intercepto médio, numa proporção  $\ell/d_A = 0,62$ . A nomenclatura (E - 413, por exemplo) refere-se à espessura das amostras em  $\mu\text{m}$  após laminação. A amostra A - 542 é aquela que foi submetida ao tratamento térmico para alívio de tensão apenas ( $600^\circ\text{C}$ , 2h). Essa amostra não possui qualquer acréscimo em seu tamanho de grão com relação ao material como recebido.

**Tabela 3: Tamanho de grão das amostras**

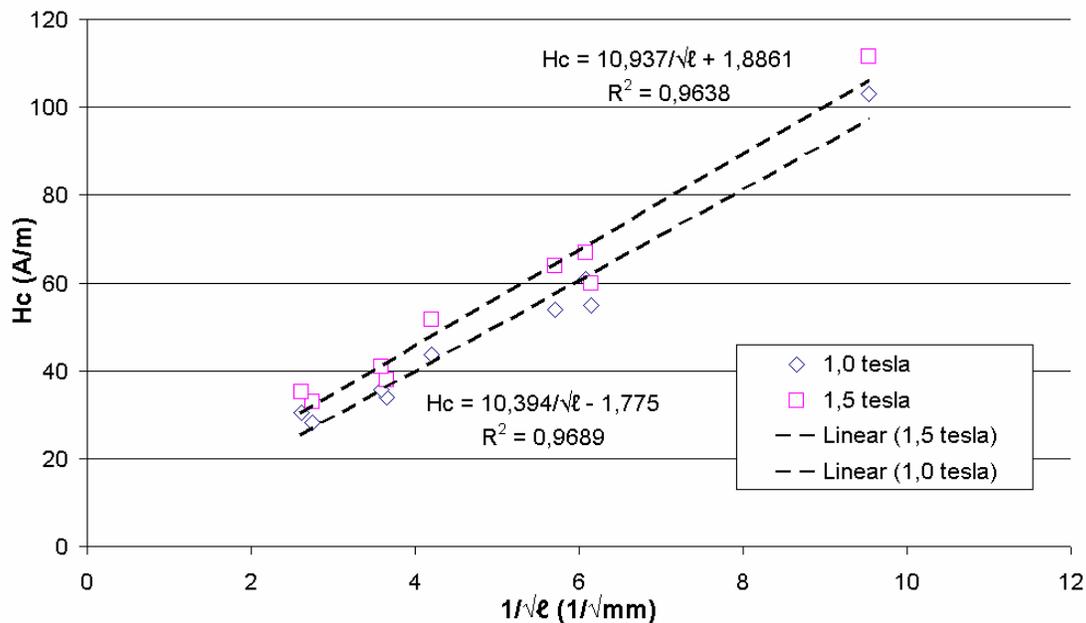
Amostra	Def. Real	$d_A$ ( $\mu\text{m}$ )	$\ell$ ( $\mu\text{m}$ )	Razão $\ell/d_A$
A - 542	0%	18	11	0,62
E -542	0%	43	26	0,61
E- 343	46%	43	27	0,62
E- 400	30%	48	31	0,63
E- 451	18%	90	57	0,63
E- 475	13%	132	78	0,59
E- 488	10%	132	75	0,57
E- 501	8%	238	147	0,62
E- 511	6%	203	133	0,66
média				0,62

A Figura 4 traz os resultados da caracterização magnética. Ela relata o comportamento do campo coercivo em função de  $1/\ell$ .



**Figura 4:** Campo coercivo ( $H_c$ ) medido em regime quase-estático em função do inverso do tamanho de grão ( $1/\ell$ ) dado pelo intercepto médio.

O comportamento de  $H_c \times 1/\sqrt{\ell}$  para 1 e 1,5T é dado na Figura 1. Novamente o método para a determinação do tamanho de grão foi o dos interceptos. Nos dois casos a linha de tendência que melhor se ajustou aos pontos experimentais foi uma reta.



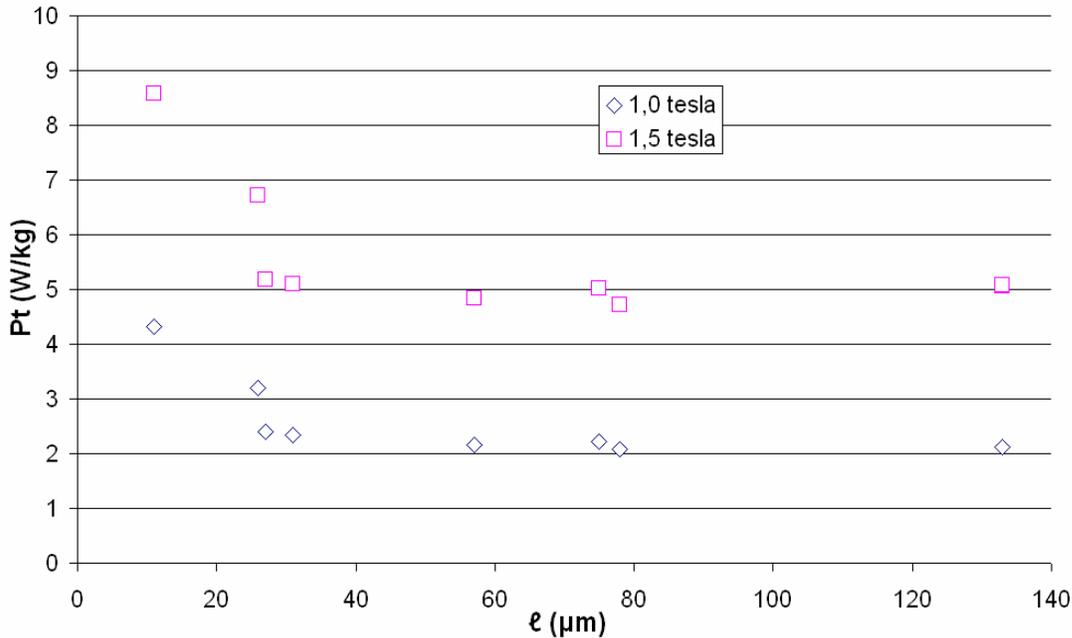
**Figura 5:** Campo coercivo ( $H_c$ ) medido em regime quase-estático em função do inverso da raiz do tamanho de grão ( $1/\sqrt{\ell}$ ) dado pelo intercepto médio.

A equação de cada uma dessas retas e seus respectivos valores de coeficiente de determinação  $R^2$  são dados na Tabela 4.

**Tabela 4:** Equações para as retas ajustadas para  $H_c \times 1/\ell$  e  $H_c \times 1/\sqrt{\ell}$  obtidas em medições no quadro de Epstein no regime quase-estático a 1 e 1,5T.

	1,0T		1,5T	
	Equação da reta	$R^2$	Equação da reta	$R^2$
$1/\ell$	$H_c = 0,8755/\ell + 24,392$	0,9881	$H_c = 0,918 + 29,$	0,976
$1/\sqrt{\ell}$	$H_c = 10,394/\sqrt{\ell} - 1,775$	0,9689	$H_c = 10,937/\sqrt{\ell} + 1,8861$	0,9638

Na Figura 6 está descrito o comportamento das perdas totais em função do tamanho de grão dado pelo intercepto médio ( $\ell$ ).



**Figura 6:** Perdas totais medidas a 60Hz para 1 e 1,5T em função do tamanho de grão  $\ell$ .

## 4 DISCUSSÃO

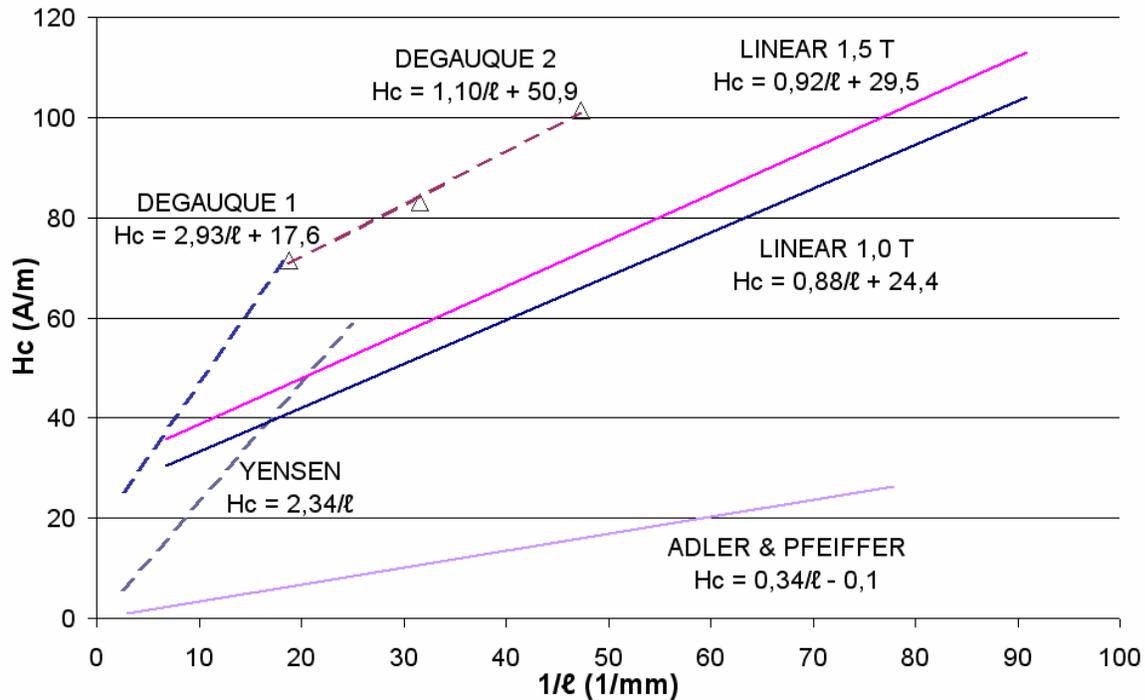
Sobre a curva de recristalização da Figura 2 deve-se destacar que quanto maior o grau de deformação, menor foi o tamanho de grão obtido, consistente com o processo de recristalização primária. Outro fato relevante é que para as chapas com deformação real de 10% e 13% o tamanho de grão resultante ao final do processo foi praticamente o mesmo (dA igual a 132  $\mu\text{m}$ ).

Sobre os diferentes métodos de medição do tamanho de grão utilizados nesse trabalho é notável que há uma relação constante (aproximadamente 0,62) entre dA e  $\ell$ , conforme indica a A nomenclatura (E - 413, por exemplo) refere-se à espessura das amostras em  $\mu\text{m}$  após laminação. A amostra A - 542 é aquela que foi submetida ao tratamento térmico para alívio de tensão apenas (600°C, 2h). Essa amostra não possui qualquer acréscimo em seu tamanho de grão com relação ao material como recebido.

Tabela 3.

Uma comparação entre os resultados obtidos por Yensen<sup>(2)</sup> e Degauque<sup>(4)</sup> para ferro puro, Adler e Pfeiffer<sup>(6)</sup> para a liga NiFe e os resultados deste trabalho em amostras de aço elétrico 0,7%Si pode ser vista na Figura 7.

A Tabela 4 informa que para 1 e 1,5T o comportamento do campo coercivo é melhor descrito como sendo linear com  $1/d$ . Porém analisando-se os valores de  $R^2$  observa-se que a lei  $1/\sqrt{l}$  também representa bom ajuste de tal forma que essa lei não pode ser descartada. Permanece portanto, plausível a hipótese de Degauque de. Outra informação importante na figura abaixo é a diferença entre os coeficientes angulares entre as retas Linear 1,0T e 1,5T se comparadas com os resultados de Yensen e Degauque.



**Figura 7:** Gráfico mostrando as curvas  $H_c \times 1/l$  obtidas nos trabalhos de Yensen, Degauque, e Adler e Pfeiffer. As linhas Linear 1 e 2 são os resultados obtidos neste trabalho.

A Figura 7 mostra que o coeficiente angular obtido experimentalmente neste trabalho é bem diferente dos citados por Yensen e Degauque. Não se pode atribuir a diferença à indução máxima, pois os resultados atuais indicam que entre 1 T e 1,5 T os coeficientes angulares são bem semelhantes. O coeficiente angular de Adler é muito menor, mas refere-se a um material com energia de parede de domínio pelo menos dez vezes menor que dos aços.

É pouco provável que se possa creditar as diferenças entre os resultados atuais e os de Yensen e de Degauque à diferenças de energia de parede de domínio, pois essa energia depende fortemente da constante de anisotropia magnetocristalina, que é pouco amostras em comparação. Por este motivo, foi realizado um ajuste linear DEGAUQUE 2, considerando apenas os três últimos pontos experimentais obtidos pelo autor. Este ajuste sugere que há mudança de comportamento magnético conforme a faixa de TG em questão.

## 5 CONCLUSÃO

Na condução desse trabalho foram utilizados dois métodos de medição de tamanho de grão. Um utilizando a área de grão obtida por análise semi-automática de micrografias, outro utilizando a contagem de interceptos. A comparação entre os resultados desses dois procedimentos mostrou que há uma relação de proporcionalidade entre os valores obtidos, a qual não apresenta correlação com o tamanho de grão, sendo aproximadamente constante (0,62) no domínio considerado. Daí conclui-se que o método de medição do TG altera o coeficiente angular da correlação entre tamanho de grão e campo coercivo, mas não altera a pequena vantagem do ajuste com expoente -1 em relação ao expoente -1/2.

Tanto as perdas histeréticas quanto o campo coercivo apresentaram comportamento linear com relação o inverso do tamanho de grão para a faixa de tamanhos analisada. Considerando que os dados obtidos corroboram com o ajuste linear DEGAUQUE 2, é conveniente averiguar o campo coercivo de aços de maior tamanho de grão ( $l > 150\mu\text{m}$ ) para definir se há mudança de comportamento ou dependência de  $H_c$  com o inverso da raiz de TG.

Para a avaliação de outras variáveis que possam afetar o valor do coeficiente angular da correlação com o campo coercivo é necessário que diferentes aços sejam caracterizados de acordo com uma única metodologia. Fica proposto o procedimento de medição de perdas histeréticas, campo coercivo e energia dissipada.

## Agradecimentos

Laboratório de Metalurgia do Pó e Materiais Magnéticos do Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT.

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 ASTM Standard, E 112 1996 (2004), “Standard test methods for determining average grain size”, ASTM International, West Conshohocken.
- 4 DEGAUQUE, J. et al., “Influence of the grain size on the magnetic and magnetomechanical properties of high-purity iron”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials v. 26, p. 261-263, 1982.
- 5 BERTOTTI, G., DI SCHINO, G., MILONE, A. F., FIORILLO, F., “On the effect of grain size on magnetic losses of 3% non-oriented SiFe”, p. C6 385-388, Journal de Physique, sept. 1985.
- 6 ADLER, E., PFEIFFER, H., “The influence of grain size and impurities on the magnetic properties of the soft magnetic alloy 47,5% NiFe”, p.172, IEEE Transactions on Magnetics, vol.mag-10, June 1974.
- 7 BATTISTINI, L., BENASCIUTTI, R., TASSI, A., “Effect of heat treatment on crystallographic and magnetic properties of magnetic steels”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, v.113, p.603-606, 1994

- 8 MAGER, A., Correspondência pessoal enviada a LANDGRAF, F. J. G., anexo em (1).
- 9 GOODENOUGH, J. B., "A theory of domain creation and coercive force", Physical Review v. 95, p. 917-932, 1954.