

# CORRELAÇÃO ENTRE PROPRIEDADES MECÂNICAS, ELETROMAGNÉTICAS E TAMANHO DE GRÃO DE UM AÇO ELÉTRICO EM FUNÇÃO DE DIFERENTES REDUÇÕES NA LAMINAÇÃO DE ACABAMENTO<sup>1</sup>

André Sereno Lopes<sup>2</sup>  
Ellen Regina Giroto<sup>3</sup>  
Antenor Ferreira Filho<sup>4</sup>

## Resumo

Objetivo do trabalho foi comparar as propriedades mecânicas, eletromagnéticas e o tamanho de grão de um aço elétrico semiprocessado em função de diferentes reduções aplicadas na laminação de encruamento e determinar a melhor redução para otimizar as propriedades magnéticas após o recozimento final. O aço semiprocessado foi encruado 4%, 6%, 7,5% e 10%, estampado, tratado termicamente e analisado quanto as suas propriedades eletromagnéticas. O resultado mostra uma variação no tamanho de grão final e conseqüente variação das propriedades mecânicas e eletromagnéticas. O trabalho possibilitou um melhor entendimento da relação entre a redução aplicada na laminação de encruamento e as propriedades do aço semiprocessado em um caso industrial específico.

**Palavras-chave:** Aço elétrico semiprocessado; Laminação de encruamento; Propriedades magnéticas.

## CORRELATION BETWEEN MECHANICAL PROPERTIES, ELECTROMAGNETIC AND GRAIN SIZE OF AN ELECTRIC STEEL FOR DIFFERENT TEMPER ROLLING REDUCTIONS

### Abstract

This paper compares the mechanical and electromagnetic properties and the grain size of an electrical steel with different skin pass and determine the best reduction for optimize the magnetic properties after the final annealing. The semi processed steel was temper rolled to 4%, 6%, 7,5% and 10%, stamped, heat treated and the magnetic properties was checked. Results present the variation on the final grain size and consequently the variation of mechanical and magnetic properties. The work made possible the comprehension of the relation between temper rolling reduction and semi processed steel properties in an industrial specific case.

**Key words:** Semi-processed electrical steel; Temper rolling; Magnetic properties.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 47º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 26 a 29 de outubro de 2010, Belo Horizonte, MG.

<sup>2</sup> Mestre em Metalurgia; Supervisor de Engenharia da Brasmetal Waelzholz S. A. Ind. e Com., SP

<sup>3</sup> Mestre em Metalurgia; Engenheira de Processos da SEW Eurodrive, Guarulhos, SP

<sup>4</sup> Doutor em Metalurgia; Diretor Industrial da Brasmetal Waelzholz S. A. Ind. e Com., SP

## 1 INTRODUÇÃO

Na constante busca de melhorar o desempenho energético de suas máquinas elétricas, a indústria e o governo desenvolvem trabalhos direcionados em reduzir cada vez o consumo de energia elétrica global.

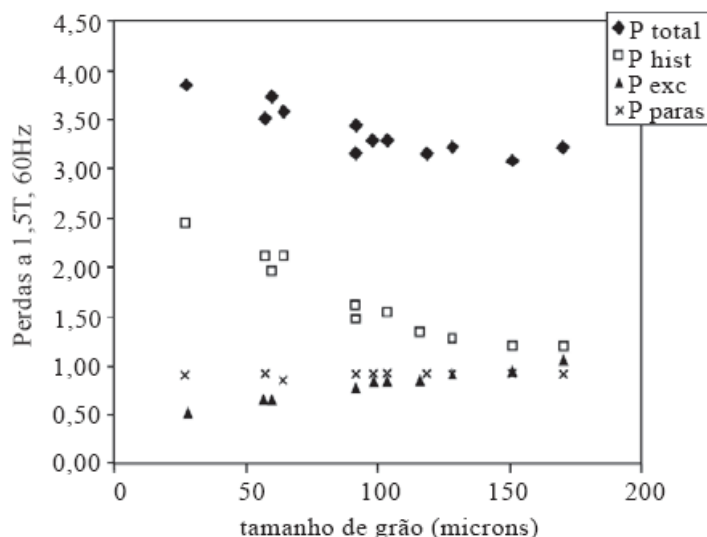
Os aços elétricos possuem melhores propriedades eletromagnéticas, como nível otimizado de perdas e permeabilidade magnética.

As máquinas elétricas apresentam fundamentalmente três fontes importantes de perdas magnéticas, sendo que a parcela de maior impacto está diretamente relacionada à lâmina de aço.

Diversos trabalhos nacionais e internacionais têm estudado a influência da laminação de encruamento nas propriedades eletromagnéticas de aços semiprocessado. O presente trabalho tem por objetivo avaliar a influência da laminação de encruamento em um caso específico industrial.

Para os aços elétricos semiprocessados a laminação de encruamento representa uma etapa importante no processamento, pois introduz uma deformação crítica nos materiais a fim de desenvolver uma microestrutura de grão crescidos. Praticam-se industrialmente pequenas deformações, da ordem de 3% a 20%.<sup>(1)</sup> Uma deformação insuficiente não fornece a energia necessária para um crescimento de grão ideal, porém deformação excessiva pode induzir recristalização primária em detrimento ao crescimento de grão.

O tamanho de grão é a variável mais conhecida no controle no valor das perdas magnéticas totais. A Figura 1 mostra que o aumento do tamanho de grão reduz muito as perdas magnéticas totais entre 15  $\mu\text{m}$  e 50  $\mu\text{m}$ , alcança um valor mínimo de perdas em torno de 150  $\mu\text{m}$  e aumenta novamente acima desse valor.<sup>(2)</sup>



**Figura 1** - Efeito do tamanho de grão nas perdas magnéticas totais ( $P_{total}$ ), perdas histeréticas ( $P_{hist}$ ), perdas parasíticas ( $P_{paras}$ ) e perdas de excesso ( $P_{exc}$ ) de um aço com 2% Si.<sup>(3)</sup>

As perdas totais consistem na somatória das componentes histeréticas, parasíticas e anômalas. Em geral as perdas histeréticas diminuem e a parasitas aumenta com o crescimento de grão de forma que existe um tamanho de grão ótimo que varia entre 100  $\mu\text{m}$  e 150  $\mu\text{m}$  dependendo do teor de silício no aço.

A fabricação das lâminas do motor inicia-se com o processo de estampagem das mesmas. A cortabilidade é uma das formas de avaliar as características físicas de um aço elétrico e está diretamente relacionada com a razão elástica, ou seja, a relação de limite de escoamento e limite de resistência desse material.<sup>(4)</sup>

A razão elástica, portanto é um bom indicador de desempenho na operação de estampagem na confecção dos motores elétricos, sendo que valores superiores a 85% são considerados desejáveis.<sup>(5)</sup>

Após o processo de conformação das lâminas, a forma mais usual de otimizar as propriedades magnéticas desses aços é então, através do tratamento térmico de recozimento, geralmente executado em uma faixa de temperaturas entre 750°C a 900°C por duas horas de patamar. O mesmo provoca o crescimento de grão, diminui o teor de carbono para níveis abaixo de 50 PPM e elimina as tensões residuais do processo de conformação anterior, garantindo assim a otimização das propriedades magnéticas.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

O aço elétrico semiprocessado utilizado apresenta a composição química detalhada na Tabela 1. Alguns parâmetros do processamento a frio do aço estão na tabela 2.

**Tabela 1** – Composição química do aço estudado (% em massa)

C	Mn	Si	Al	P	S
0,0010	0,5240	0,8185	0,2152	0,0374	0,0075

**Tabela 2** – Parâmetros de processamento a frio do aço

Redução de desbaste a frio	Aproximadamente 70%
Recozimento em caixa em atmosfera de H <sub>2</sub>	700°C
Rugosidade do cilindro de laminação de encruamento	0,50 µm Ra

Foram aplicadas quatro diferentes reduções na laminação de encruamento para avaliar a influência da deformação plástica sobre as propriedades mecânicas, tamanho de grão e propriedades magnéticas do aço após o tratamento térmico final em temperatura constante e ponto de orvalho de prática industrial. As reduções aplicadas foram respectivamente 4,0%, 6,0%, 7,5% e 10%.

Amostras de tamanho 30 x 305 mm, sendo 8 na direção longitudinal e 8 na direção transversal foram cortadas após cada redução aplicada e foram submetidas ao tratamento térmico de recozimento em forno industrial.

As propriedades magnéticas para cada redução foram determinadas através do Ensaio de Epstein. As perdas magnéticas sob indução de 1,5 T e frequência de ensaio de 50 Hz e a permeabilidade B<sub>50</sub> sob um campo magnético de 5.000 A/m e frequência de ensaio também de 50 Hz. A perda histerética de cada amostra foi determinada através do método de extrapolação dos valores de perdas totais e as perdas anômalas foram obtidas pelo método da diferença.<sup>(2)</sup>

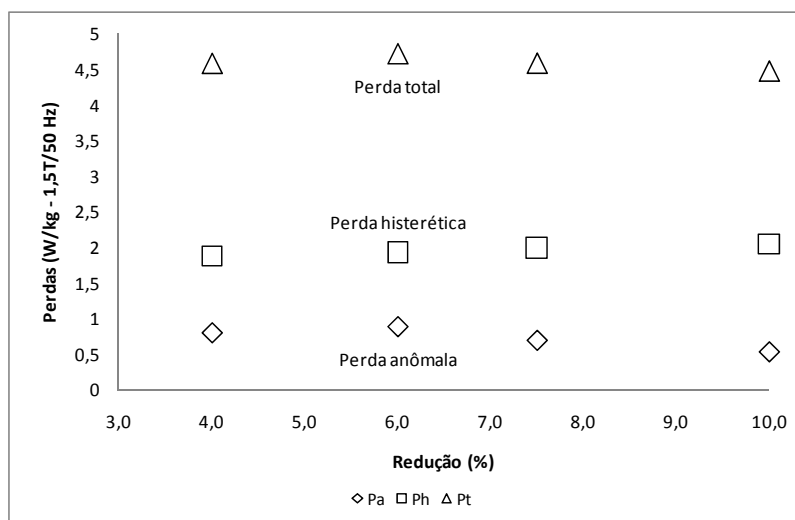
Para o ensaio de tração foram confeccionados três corpos de prova para cada redução aplicada conforme a norma NBR 6152. O ensaio foi realizado na direção longitudinal à direção de laminação antes do recozimento. Foram também realizados ensaios na direção transversal à laminação, porém devido os resultados serem

muito semelhantes ao da direção transversal, não serão aqui demonstrados e discutidos.

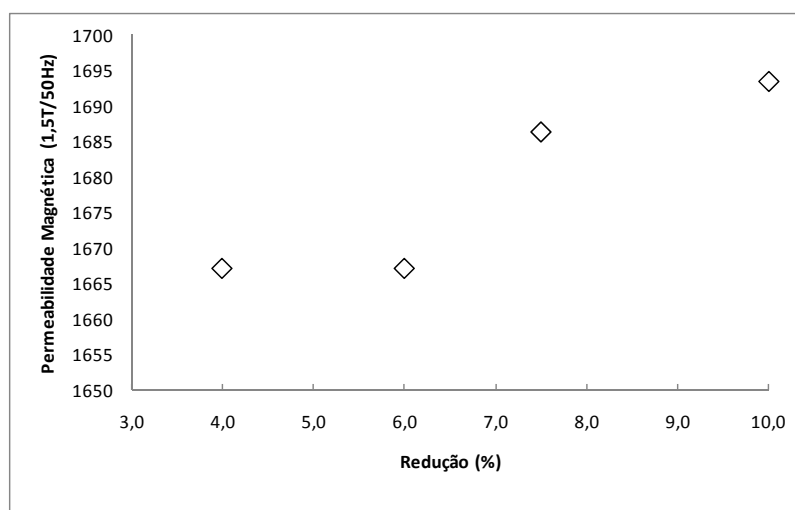
As análises metalográficas foram realizadas na secção longitudinal das amostras após o recozimento e foi utilizado o método dos interceptos lineares para determinar o tamanho de grão, conforme estabelecido na norma NBR 11568 com o auxílio de um microscópio óptico.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados da análise das propriedades magnéticas, perda magnética e permeabilidade magnética  $B_{50}$ , obtidos em ensaio de Epstein foram plotados em gráficos, conforme ilustram as Figuras 2 e 3.



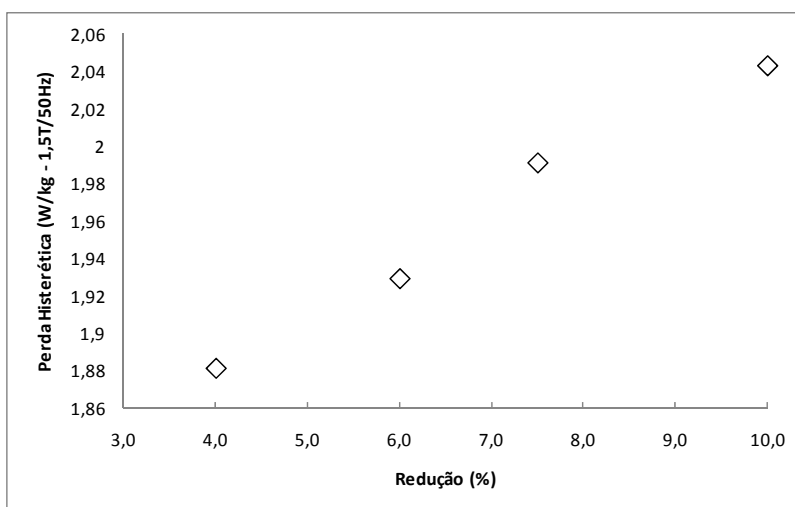
**Figura 2** - Variação das perdas totais (1,5T/50Hz) e separação em componentes histeréticas, e anômalas em função das diferentes reduções aplicadas.



**Figura 3** – Variação da permeabilidade magnética  $B_{50}$  em função das diferentes reduções aplicadas.

Avaliando os resultados apresentados nas Figuras 1 e 2, é possível notar que não há diferença significativa dos resultados de perdas totais em função das diferentes reduções aplicadas. Já o mesmo comportamento não foi observado para os valores de permeabilidade magnética  $B_{50}$ , a qual apresentou um ligeiro aumento com o aumento do grau de redução na laminação de encruamento.

A Figura 4 detalha a evolução dos valores de perda histerética em função das diferentes reduções aplicadas. Os resultados mostram que os valores de perda histerética foram crescentes em função do aumento da redução da amostra, uma vez que as perdas histeréticas são fortemente influenciadas pela microestrutura.



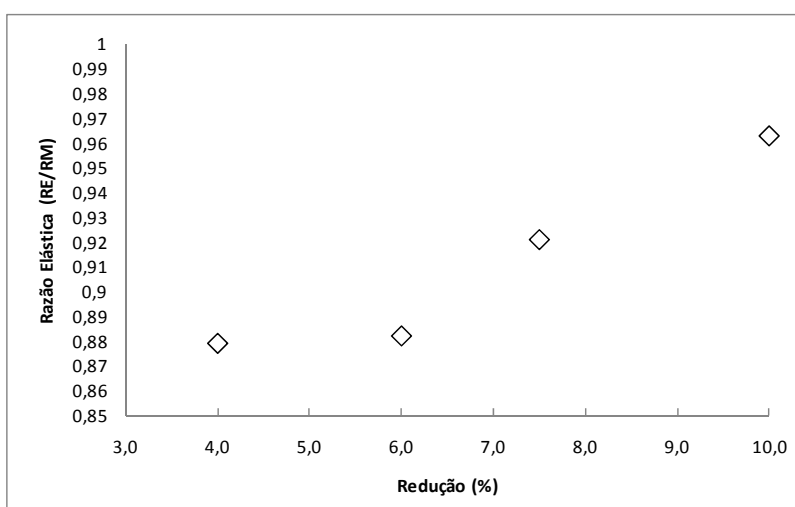
**Figura 4** - Variação das perdas histeréticas em função das diferentes reduções aplicadas.

A partir dos resultados do limite de escoamento e limite de ruptura do material obtidos no ensaio de tração das amostras, foi possível determinar a razão elástica em função da redução aplicada, cujos valores estão detalhados na Tabela 3.

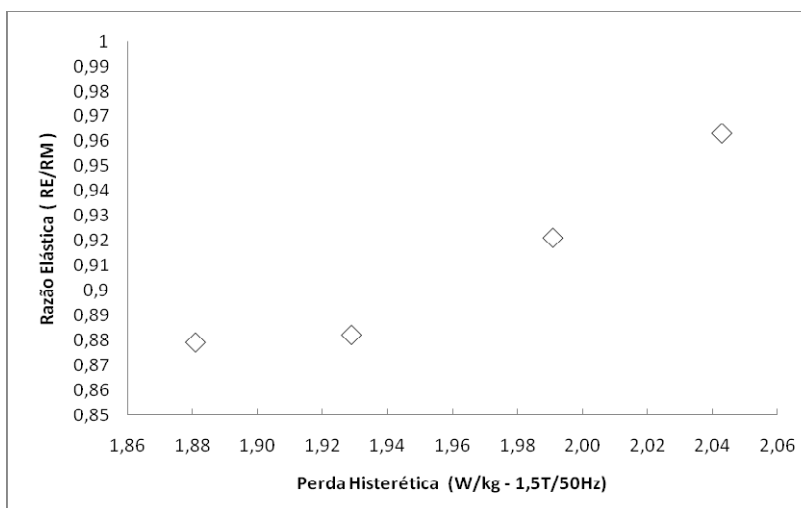
**Tabela 3** – Resultados do ensaio de tração

Redução (%)	Razão elástica
4	0,879
6	0,882
7,5	0,921
10	0,963

Os dados da Tabela 2 foram plotados na forma gráfica e estão apresentados nas Figuras 5 e 6, que mostram a variação da razão elástica em função das diferentes reduções e perdas histeréticas respectivamente.



**Figura 5** - Variação razão elástica do material antes do recozimento em função das diferentes reduções aplicadas.



**Figura 6** - Variação das perdas histeréticas em função da razão elástica após tratamento térmico.

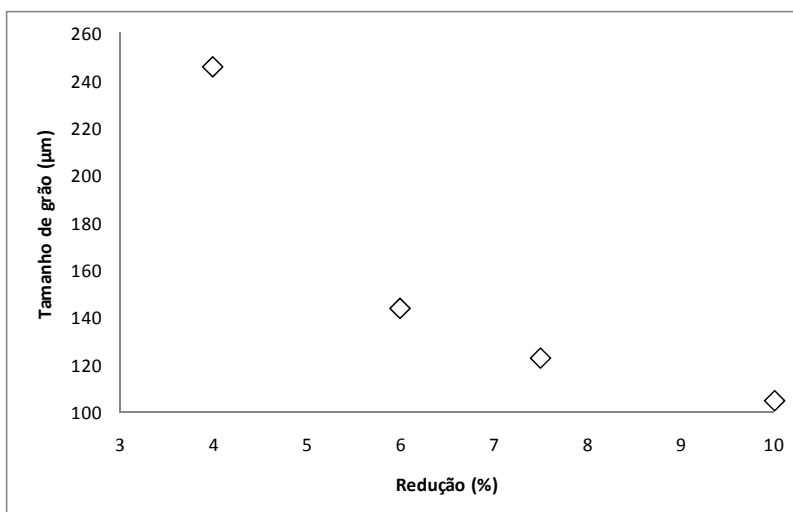
A análise das figuras mostra que os resultados apresentaram a mesma tendência, ou seja, quanto maior a redução aplicada, maior foi a razão elástica determinada e maior a perda histerética das amostras após o recozimento.

A Figura 7 detalha o aspecto microestrutural das amostras após o tratamento térmico final em função da redução aplicada na laminação de encruamento. Nota-se que, quanto maior a redução aplicada, menores foram os tamanhos de grãos médios após o tratamento térmico.

Redução (%)	Após o Recozimento	Redução (%)	Após o Recozimento
4		7,5	
6		10	

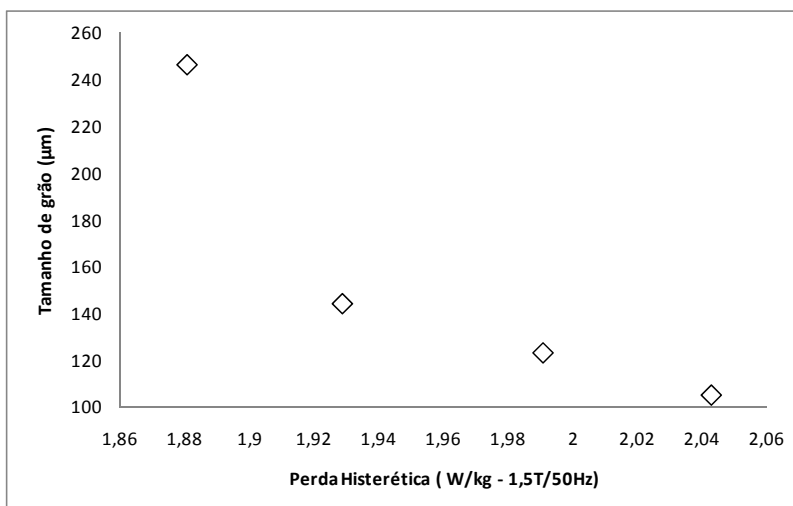
**Figura 7** – Variação do tamanho de grão das amostras em função das diferentes reduções na laminação de encruamento após o tratamento térmico final.

A evolução do tamanho de grão médio em função das diferentes reduções aplicadas na laminação de encruamento, pode também ser observado na forma gráfica na Figura 8.



**Figura 8** - Variação do tamanho de grão em função das diferentes reduções na laminação de encruamento.

A Figura 9 detalha a influência do tamanho de grão médio nas perdas histeréticas. Os resultados mostram que os valores de perda histerética foram maiores para as amostras que apresentaram os menores tamanhos de grão médio, ou para as amostras de maior redução na laminação de encruamento.



**Figura 9** - Variação das perdas histeréticas em função do tamanho de grão após o recozimento final.

## 4 CONCLUSÃO

Os resultados mostram que, a redução aplicada no passe de encruamento influencia diretamente na microestrutura desenvolvida após o tratamento térmico final e conseqüentemente nas propriedades magnéticas desse aço elétrico.

A redução influencia também os valores de razão elástica e conseqüentemente as propriedades mecânicas desse aço como limite de resistência e limite de escoamento.

Não é possível obter um valor ótimo de razão elástica para aperfeiçoar o processo de estampagem do aço elétrico através da redução de encruamento sem interferir diretamente em suas propriedades magnéticas.

## Agradecimentos

A parceria técnica SEW & Brasmetal pela realização deste.

## REFERÊNCIAS

- 1 Cheong, S.W.; HILINSKI, E.J.; ROLLETT, A.D.; "Effect of Temper rolling on Texture Formation in a low Loss Cold-rolled Magnetic Lamination Steel. Metallurgical and Materials Transactions A, v. 34A, n. 1311, June 2003
- 2 LANDGRAF, Fernando José Gomes, "Propriedades Magnéticas dos Aços para fins elétricos", IPT, (2001).
- 3 CUNHA, M. A.; PAOLINELLI, S. C.; CÉSAR, M. G. M. M., "Avanços na produção de aço silício de grão não orientado na Acesita", 56º Congresso Anual da ABM, (2001).
- 4 Acesita, Aço silício para núcleos magnéticos, Catálogo Técnico, Acesita – Cia. Aços Especiais Itabira, Timóteo, Brasil, p.30, (1998).
- 5 MARRA, K. M., MELO, E. G., RIBEIRO, C. F. 54º Congresso Anual da ABM, São Paulo, Brasil, p. 198 – 214, (1999).