

# EFEITO DA REDUÇÃO DE ESPESSURA E DA APLICAÇÃO DE DIFERENTES TAXAS DE DEFORMAÇÃO NA LAMINAÇÃO DE ENCRUAMENTO EM AÇOS PARA FINS ELÉTRICOS<sup>1</sup>

Mariana Corrêa Assis<sup>2</sup>  
Marcelli Alexandre Trindade<sup>3</sup>  
Reginaldo Gomes Toledo<sup>4</sup>  
Júlio César Lopes da Silva<sup>5</sup>  
Kleidon Rodrigues de Almeida<sup>2</sup>  
Christien Guisard Hauegen<sup>2</sup>

## Resumo

A necessidade atual de reduzir o consumo de energia elétrica vem fazendo com que os fabricantes de motores elétricos trabalhem para melhorar o rendimento energético de seus produtos. Com o intuito de otimizar as propriedades magnéticas de um aço CSN de grão não orientado semiprocessado, este trabalho visa avaliar o comportamento das perdas e da permeabilidade magnética a partir da redução de espessura e da aplicação de diferentes taxas de deformação na laminação de encruamento. O processamento ocorreu em escala piloto a partir de amostras full-hard. Espera-se avaliar as propriedades obtidas após os tratamentos térmicos aplicados nos clientes com a finalidade de permitir a utilização de aços menos carregados quimicamente, visando à redução de custos na cadeia e com rendimentos energéticos mais eficientes.

**Palavras-chave:** Aços elétricos; Tratamento térmico; Laminação de encruamento; Espessura.

## EFFECT OF REDUCTION OF THICKNESS AND APPLICATION OF DIFFERENT RATES OF SKIN PASS IN STEEL FOR ELECTRICAL PURPOSES

## Abstract

The current need to reduce the consumption of electricity is causing manufacturers of electric motors working to improve the energy efficiency of their products. In order to optimize the magnetic properties of a steel CSN non-oriented semiprocessado, this study aims to evaluate the behavior of the losses and the magnetic permeability from the thickness reduction and the application of different rates of deformation in rolling strain hardening. Processing took place in a pilot samples from full-hard. Expected to evaluate the properties obtained after heat treatments applied to customers in order to allow the use of less steel chemically loaded, in order to reduce costs in the chain and energy yields more efficient.

**Key words:** Electrical steels; Heat treatment; Skin pass; Thickness.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 50º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 18 a 21 de novembro de 2013, Ouro Preto, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Metalúrgico da Companhia Siderúrgica Nacional. Volta Redonda, RJ, Brasil.

<sup>3</sup> Engenheranda em Engenharia Metalúrgica. Estagiária da Companhia Siderúrgica Nacional. Volta Redonda, RJ, Brasil.

<sup>4</sup> Engenheiro Eletricista da Companhia Siderúrgica Nacional. Volta Redonda, RJ, Brasil.

<sup>5</sup> Técnico Metalurgista da Companhia Siderúrgica Nacional. Volta Redonda, RJ, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

A maior parte da energia elétrica produzida no mundo é consumida em motores elétricos.<sup>(1)</sup> O desenvolvimento de soluções para atingir o alto rendimento dos motores com a minimização das perdas magnéticas, é um dos importantes focos para a redução do consumo de energia e problemas ambientais.

Os aços elétricos semiprocessados são utilizados na fabricação de motores e compressores elétricos, podendo ser silicosos ou não, necessitam receber um tratamento térmico final de recozimento nas empresas fabricantes,<sup>(2)</sup> visando a redução do teor de carbono, o crescimento dos grãos, a eliminação das discordâncias, eliminação das tensões residuais, a formação de uma camada isolante de óxido.

As perdas magnéticas são o principal parâmetro técnico de seleção e controle dos aços para fins elétricos, e dependem de características eletromagnéticas do ensaio (indução máxima e frequência de excitação), de características físicas da amostra (espessura, direção da amostra em relação à direção de laminação, resistividade elétrica e densidade) e características microestruturais do material (densidade de discordâncias, tamanho de grão, textura, distribuição de tamanho de inclusões e precipitado).<sup>(2)</sup>

As perdas magnéticas podem ser divididas em três componentes: as perdas histeréticas, as perdas anômalas e as perdas parasíticas. As perdas histeréticas são geradas durante a magnetização dos materiais ferromagnéticos e sua intensidade depende de parâmetros microestruturais, como densidade de discordâncias, tamanho de grão e inclusões não metálicas. As perdas parasíticas (ou clássicas) estão relacionadas com a variação do fluxo magnético que induz a passagem de corrente elétrica no interior da chapa, estando diretamente relacionada com a resistividade elétrica do material e da espessura das chapas que compõe o circuito magnético. Assim quanto mais fino for o material, menor será a corrente elétrica, logo menor as perdas parasíticas. As perdas anômalas é a diferença da medida experimental entre as parcelas histeréticas e parasíticas.<sup>(2)</sup>

O processamento de aços elétricos semiprocessados inclui uma etapa denominada de laminação de encruamento ou skin pass, na qual se aplica uma deformação de 4% a 8% com o intuito de chegar ao tamanho de grão ótimo entre 100  $\mu\text{m}$  a 150 $\mu\text{m}$  após o recozimento final, com o objetivo principal de minimizar as perdas magnéticas.<sup>(3)</sup>

O objetivo deste trabalho consiste em avaliar o comportamento das propriedades magnéticas e das características microestruturais, a partir da redução de espessura das chapas e da aplicação de diferentes taxas de deformação (5% e 9%) na laminação de encruamento.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizado um aço CSN, semiprocessado, com composição química conforme é apresentado na Tabela 1.

**Tabela 1:** Composição química das amostras

Composição Química (% máx)						
Aço CSN	C	Mn	P	S	Si	Al
	0,005	0,200	0,015	0,010	0,300	0,045

Este material foi recebido da usina na condição full hard com aproximadamente 82% de redução a frio com espessura 0,60 mm +/- 0,07, de onde foram retirados 48 CPs de 150 mm x 300 (dL) mm sendo 24 na direção transversal a de laminação e 24 na direção longitudinal. Essas amostras foram então laminadas em um laminador piloto Duo Reversível, com o intuito de atingir as espessuras, conforme é mostrado na Tabela 2. Em seguida as amostras passaram pela simulação de um recozimento contínuo utilizando um forno mufla, para a etapa de aquecimento e encharque. Em seguida, foi feita a simulação da laminação de encruamento aplicando um skin pass de 5% e 9% para cada conjunto de espessuras finais desejadas, conforme é apresentado na Tabela 2.

**Tabela 2:** Esquema das condições de processamentos aplicados.

Tipo de processamento	Full hard	Laminação a frio (piloto)	Laminação de encruamento (piloto)	
	Espessura (mm)		Skin pass	Espessura final
Condição 1	0,628	0,473	5%	0,45 mm
Condição 2	0,638	0,494	9%	0,45 mm
Condição 3	0,642	0,525	5%	0,50 mm
Condição 4	0,638	0,549	9%	0,50 mm
Condição 5	0,670	0,578	5%	0,55 mm
Condição 6	0,654	0,604	9%	0,55 mm

Com a etapa de processamento concluída, estes materiais foram estampados na forma de lamelas (280mm x 30mm), tanto no sentido longitudinal quanto transversal de laminação, e tratados termicamente. Para cada condição de processamento foram montados dois pacotes, para serem simulados os tratamentos térmicos dos Fabricantes em duas situações, no processo à úmido, ou descarbonetante, e no processo à seco. No tratamento térmico à úmido, a atmosfera do forno é de 90% de Hidrogênio e 10% de Nitrogênio, o aquecimento se dá a 7°C/min, em aproximadamente 550 °C a atmosfera passa a ser descarbonetante, HN+ H<sub>2</sub>O. O encharque ocorre em 770°C, por duas horas. Posteriormente o material é resfriado a uma taxa de 2°C/min, quando o forno atinge 550°C a atmosfera passa a ser de nitrogênio até 400°C, quando o forno é desligado, seguido de um resfriamento lento com o forno fechado até a temperatura ambiente.

No tratamento à seco, o aquecimento também ocorre à uma taxa de 7°C/min, com atmosfera HN. O encharque ocorre a 810°C, por um período de duas horas, sem modificação da atmosfera. O resfriamento é feito à uma taxa de 2°C/min. Quando o forno atinge 550°C, a atmosfera passa a ser de nitrogênio até 400°C, seguido de resfriamento lento com o forno fechado até a temperatura ambiente.

Foram realizados após a laminação de encruamento e após os tratamentos térmicos a seco e a úmido análises químicas, metalográficas, de dureza e magnéticas.

Com o intuito de verificar o nível de descarbonetação do material em função do tratamento, foram realizadas medições do teor de carbono, obtidas através de um equipamento tipo Leco, modelo CS 444 e TC 436.

Os ensaios de dureza foram realizados em um durômetro modelo HPO250 da marca Fritz Heckert utilizando uma carga de 5kg, e as medidas foram obtidas a partir da leitura em um perfilômetro modelo V12A da Nikon.

A perda magnética e a permeabilidade foram medidas através de um Quadro de Epstein, fornecido pela Brockhaus Messtechnik, modelo MPG100D, sendo utilizadas induções de 1T em frequência de 50Hz.

Todas as amostras foram analisadas em um microscópio óptico Zeiss Axiotho, previamente polidas e atacadas com Nital 3%, onde se obteve tamanho de grão (norma ASTM E112), microscopia e metalografia.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

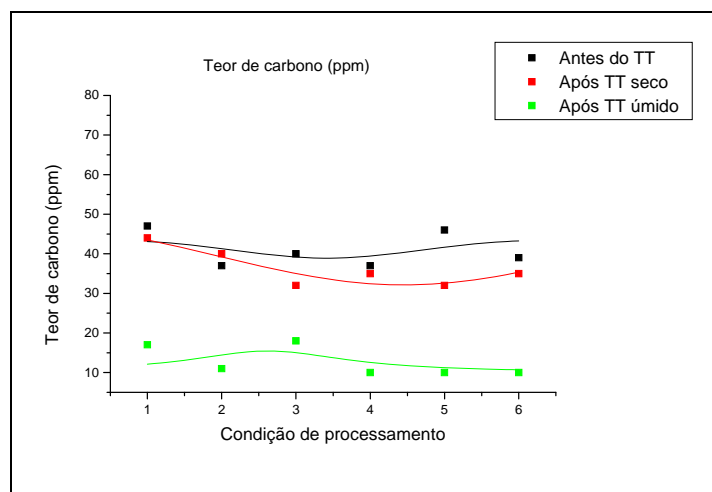
A Tabela 3 apresenta as variações do teor de carbono das amostras de cada condição de processamento (1 a 6) antes e depois dos tratamentos térmicos.

**Tabela 3.** Variação do teor de carbono nas amostras

Condição de processamento			Teor de carbono (ppm)		
			Antes	TT seco	TT úmido
<b>Aço CSN</b>	Condição 1	0,45 mm - 5%	47	44	17
	Condição 2	0,45 mm - 9%	37	40	11
	Condição 3	0,50 mm - 5%	40	32	18
	Condição 4	0,50 mm - 9%	37	35	10
	Condição 5	0,55 mm - 5%	46	32	10
	Condição 6	0,55 mm - 9%	39	35	10

A Figura 1 mostra os resultados comparativos dos níveis de carbono das amostras em relação à condição antes e após de cada tratamento. O carbono, assim como o nitrogênio, o enxofre e o oxigênio são impurezas que afetam as propriedades magnéticas por formarem partículas no interior do aço. A retirada do carbono resulta na redução das perdas magnéticas visto que o carbono residual, após tratamento térmico, fica em solução sólida, e não precipitado na matriz, não impedindo assim a movimentação das paredes de domínio durante a passagem de fluxo magnético.

Estes precipitados, principalmente carbonetos e nitretos, também são responsáveis pelo envelhecimento dos aços, ou seja, precipitação ao longo do tempo. No aço estudado, com teores de no máximo 60ppms, praticamente não sofrem envelhecimento.



**Figura 1.** Gráfico comparativo da variação do teor de carbono em cada condição de processamento antes e depois do tratamento térmico. (TT- tratamento térmico)

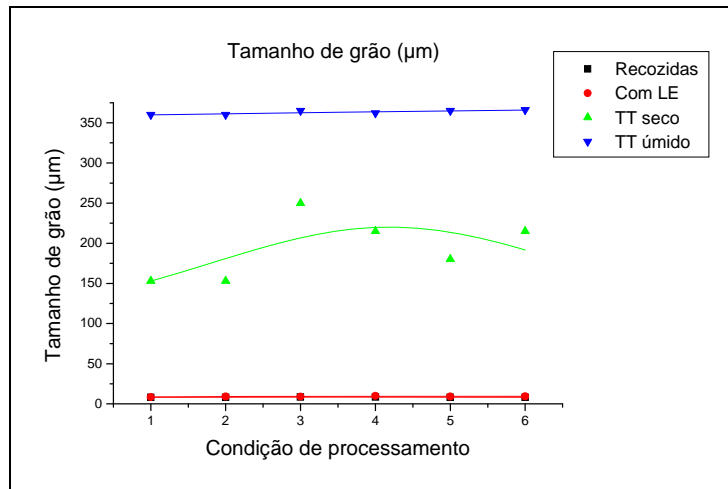
Podemos notar assim a eficiência e a importância do tratamento térmico final realizado no cliente quanto a descarbonetação do material, e como o esperado o teor de carbono para as amostras tratadas à úmido teve uma redução em média de 30 ppm o que auxilia no decréscimo das perdas magnéticas.

A Tabela 4 indica o tamanho de grão das amostras para cada condição de processamento, antes e após os tratamentos térmicos.

**Tabela 4.** Tamanho de Grão das amostras

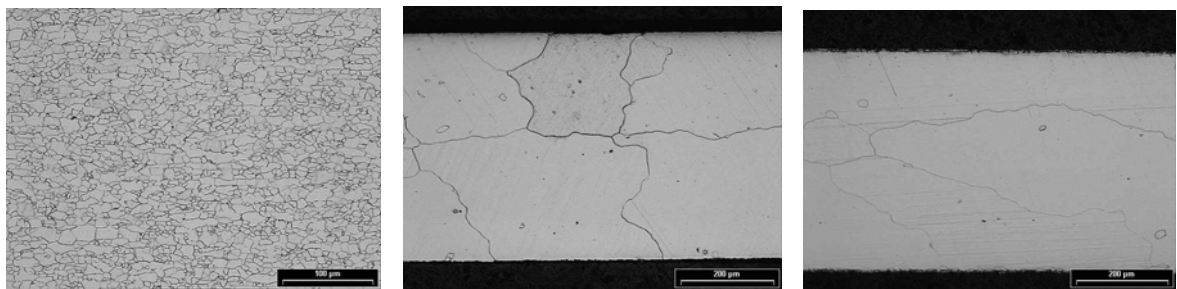
Tamanho de grão ( $\mu\text{m}$ )							
Condição de processamento				Recozidas	Com LE	TT seco	TT úmido
<b>Aço CSN</b>	Condição 1	0,45 mm	5%	8,22	8,41	153	360
	Condição 2	0,45 mm	9%	8,22	9,18	153	360
	Condição 3	0,50 mm	5%	8,45	9,02	250	365
	Condição 4	0,50 mm	9%	8,45	10,03	215	362
	Condição 5	0,55 mm	5%	8,07	9,16	180	365
	Condição 6	0,55 mm	9%	8,07	9,23	215	366

O tamanho de grão é uma variável importante no controle do valor das perdas magnéticas, pois quanto menor o número de contornos de grão, mais facilmente as paredes em domínio se movimentarão, reduzindo o ancoramento das mesmas nos contornos de grão. A literatura cita um tamanho de grão ótimo em torno de  $150\mu\text{m}$ , acima disto, há uma deterioração das propriedades em virtude das mudanças de textura nos processos de variação do tamanho de grão. As amostras tratadas à seco atingiram o valor ótimo para o tamanho de grão, já as tratadas à úmido apresentam valores superiores à  $150\mu\text{m}$ , como mostra a Figura 2.

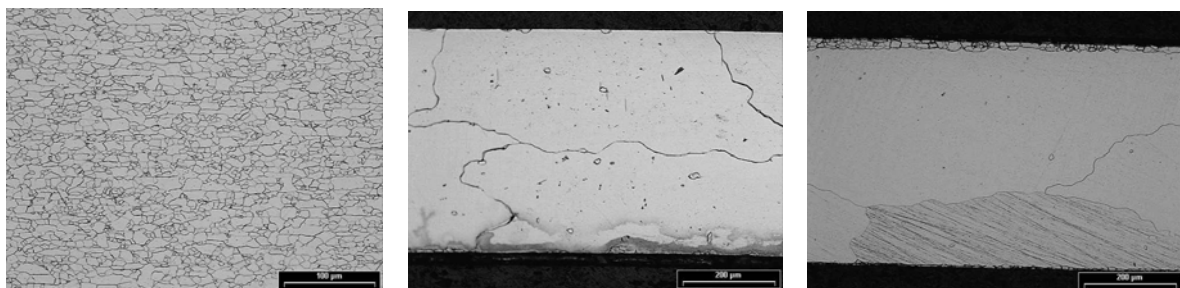


**Figura 2:** Evolução do tamanho de grão nas etapas do processamento

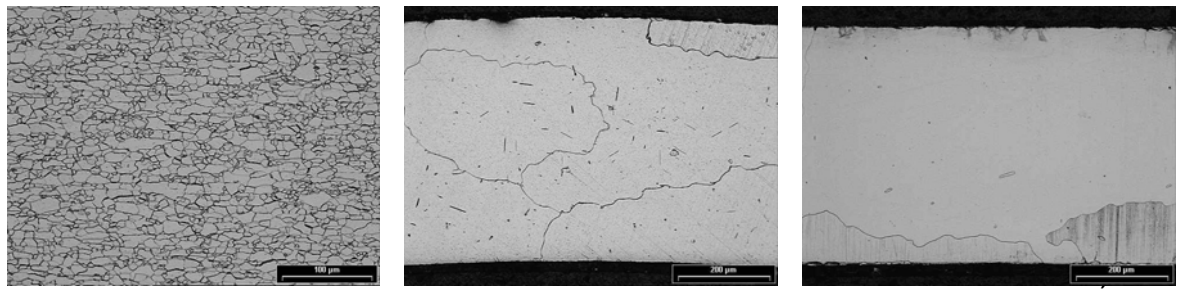
As Figuras 3 a 8, mostram respectivamente, as microscopias das amostras referente a cada condição de processamento (1 a 6) antes e em cada situação de tratamento térmico, revelando em todos os casos, uma microestrutura formada por grãos ferríticos heterogêneos associados a cementita globular fina dispersa na matriz.



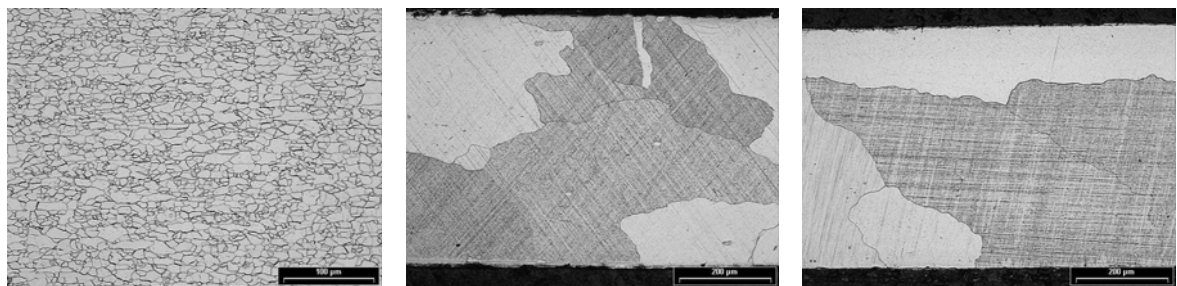
Sem Tratamento      Tratado Termicamente Seco      Tratado Termicamente à Úmido  
**Figura 3.** Fotomicrografia da condição 1 (0,45 mm - 5%). Aumento de 100x.



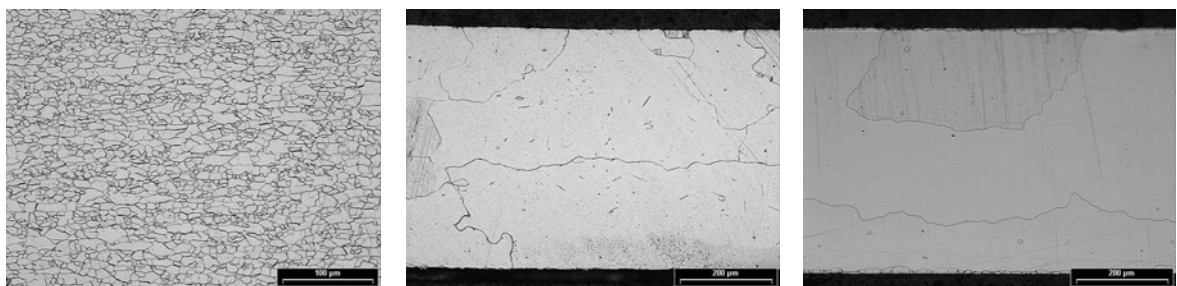
Sem Tratamento      Tratado Termicamente Seco      Tratado Termicamente à Úmido  
**Figura 4.** Fotomicrografia da condição 2 (0,45 mm - 9%). Aumento de 100x.



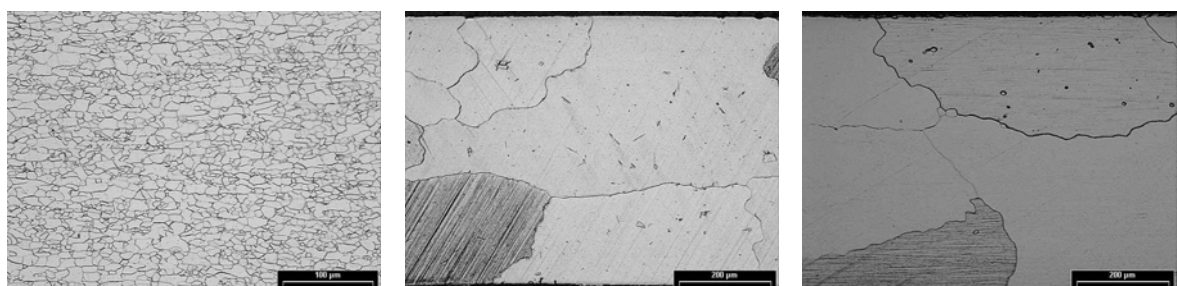
Sem Tratamento      Tratado Termicamente Seco      Tratado Termicamente à Úmido  
**Figura 5.** Fotomicrografia da condição 3 (0,50 mm - 5%). Aumento de 100x.



Sem Tratamento      Tratado Termicamente Seco      Tratado Termicamente à Úmido  
**Figura 6.** Fotomicrografia da condição 4 (0,50 mm - 9%). Aumento de 100x.



Sem Tratamento      Tratado Termicamente Seco      Tratado Termicamente à Úmido  
**Figura 7.** Fotomicrografia da condição 5 (0,55 mm - 5%). Aumento de 100x.



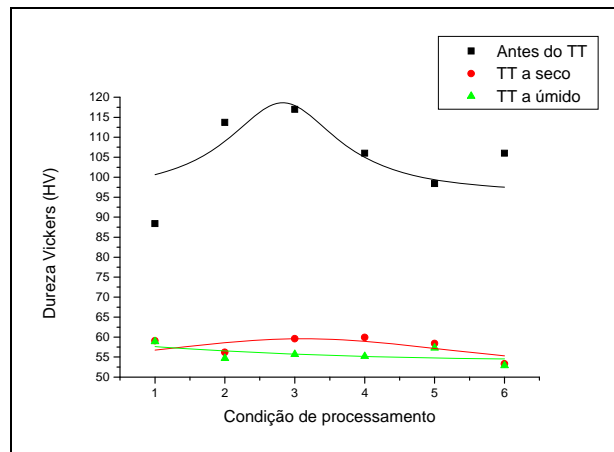
Sem Tratamento      Tratado Termicamente Seco      Tratado Termicamente à Úmido  
**Figura 8.** Fotomicrografia da condição 6 (0,55 mm - 9%). Aumento de 100x

A Tabela 5 mostra os resultados do Ensaio de Dureza para cada condição de processamento (1 a 6) em cada situação de tratamento.

**Tabela 5.** Dureza das amostras de cada condição de processamento, em cada tratamento

Condição de processamento			Dureza Vickers (5kg)		
			Antes do TT	TT seco	TT úmido
<b>Aço CSN</b>	Condição 1	0,45 mm - 5%	88,4	59,1	58,9
	Condição 2	0,45 mm - 9%	113,7	56,2	54,7
	Condição 3	0,50 mm - 5%	117,0	59,6	55,7
	Condição 4	0,50 mm - 9%	106,0	59,9	55,2
	Condição 5	0,55 mm - 5%	98,4	58,4	57,3
	Condição 6	0,55 mm - 9%	106,0	53,3	52,9

A Figura 12 mostra um gráfico comparativo da dureza para as diferentes condições de processamento em relação a cada tipo de tratamento térmico.



**Figura 9.** Dureza das amostras em cada condição de processamento em relação a cada tratamento térmico.

A partir dos dados encontrados, pode-se concluir que com o tratamento térmico, a dureza das lamelas reduziu quase que pela metade. Isso ocorreu devido, principalmente, ao crescimento de grão e alívio de tensões. Não houve uma interferência quanto às diferentes condições de processamento, espessura e taxas de deformação na laminação de encruamento, apresentando valores de dureza estáveis em todas as condições.

A Tabela 6 mostra os resultados do Ensaio de Epstein em cada condição de processamento antes e após os tratamentos térmicos.



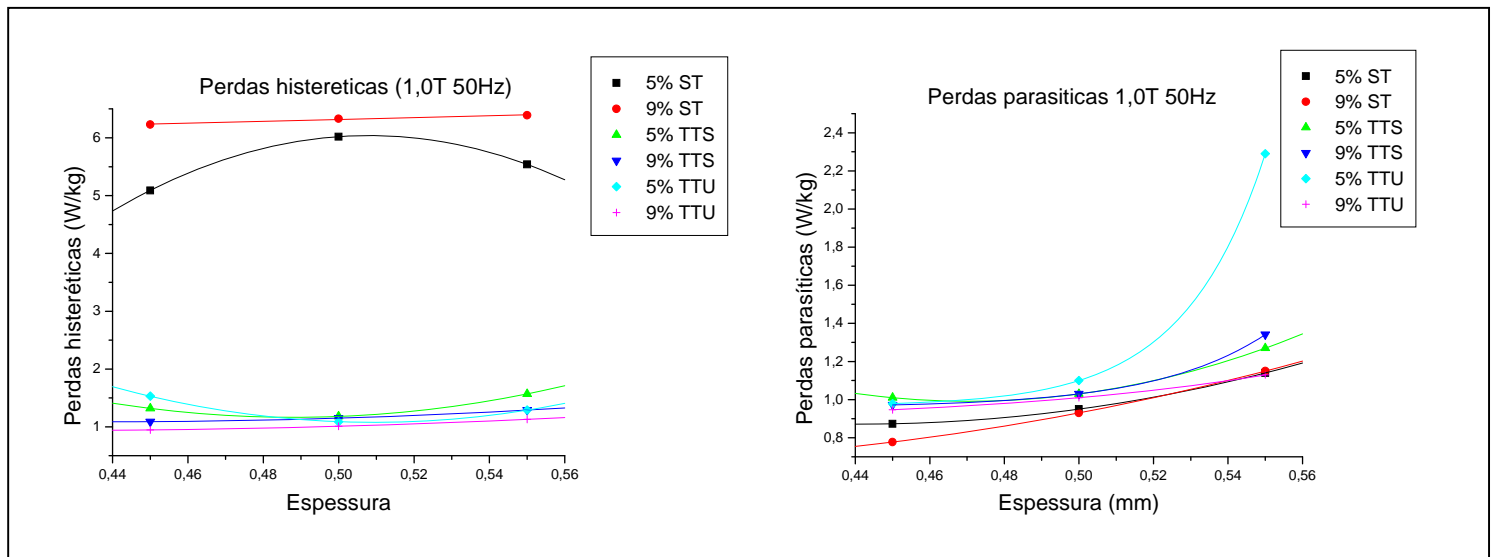
**Tabela 6.** Propriedades magnéticas analisadas antes e após cada tratamento

Condição de processamento	Propriedades magnéticas 1,0T - 50Hz											
	Antes do TT				Após TT seco				Após TT úmido			
	Ph (W/Kg)	Pp (W/Kg)	$\mu$	$\rho$ ( $10^{-2}$ $\mu\Omega$ cm)	Ph (W/Kg)	Pp (W/Kg)	$\mu$	$\rho$ ( $10^{-2}$ $\mu\Omega$ cm)	Ph (W/Kg)	Pp (W/Kg)	$\mu$	$\rho$ ( $10^{-2}$ $\mu\Omega$ cm)
0,45 mm - 5%	5,09	0,873	1270	1,22	1,32	1,01	5880	1,05	1,53	0,979	5572	1,08
0,45 mm - 9%	6,23	0,777	1025	1,38	1,09	0,972	6955	1,09	0,947	0,965	7639	1,10
0,50 mm - 5%	6,02	0,950	1028	1,38	1,18	1,03	6379	1,27	1,09	1,10	6620	1,19
0,50 mm - 9%	6,33	0,930	977	1,41	1,15	1,03	6544	1,27	1,01	1,08	6930	1,20
0,55 mm - 5%	5,54	1,14	1170	1,39	1,57	1,27	4998	1,25	1,29	1,27	5579	1,25
0,55 mm - 9%	6,39	1,15	958	1,38	1,29	1,34	5127	1,18	1,13	1,38	5668	1,15

Nota: TT= tratamento térmico; Ph= perdas histeréticas, Pp= perdas parasíticas

Pela lei da recristalização quanto maior a redução, maior será a energia armazenada durante a deformação, logo menor será o grão recristalizado.<sup>(1)</sup> Existe uma faixa (4% a 8%) em que este grau de deformação situa-se na região onde as discordâncias já estão formando emaranhados, porém ainda não formam células. Deste modo não haverá muitos núcleos de recristalização favorecendo uma maior taxa de crescimento de grão.<sup>(3)</sup> Podemos observar na Figura 9 que antes do tratamento térmico as perdas com 9% de deformação são bem mais elevadas quando comparadas com o material que foi deformado a 5%, isso ocorre devido a laminação de encruamento deteriorar as propriedades magnéticas antes do recozimento final, devido a dificuldade de movimentação das paredes de domínio, uma vez que a densidade de discordâncias aumentam e passam a funcionar como ancoramento das paredes. Após o tratamento térmico, com a ocorrência da recristalização, há um aumento do tamanho de grão, o que propicia uma redução das perdas pela componente histerética.

As perdas parasíticas, aquelas que ocorrem por corrente de Foucault durante a magnetização e desmagnetização do material, podem ser minimizadas através da redução da espessura. Quanto mais fino o material, mais facilmente o fluxo magnético percorre a lâmina, e menos energia é dissipada através das correntes parasíticas. Podemos notar na Figura 10 os resultados das propriedades magnéticas a 1,0T/50Hz, para todas as situações analisadas.

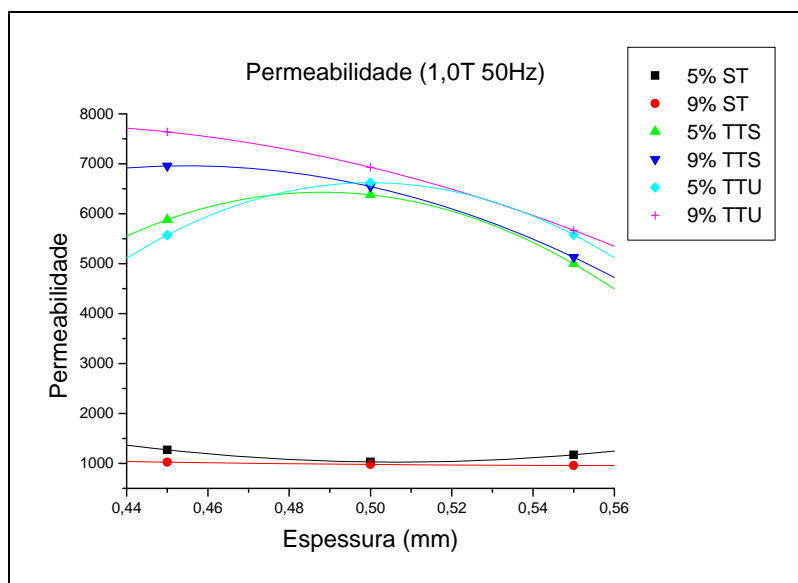


**Figura 10.** Componentes das perdas magnéticas para cada condição de processamento

A partir da separação das perdas, fica mais fácil de observar a influência da espessura e da deformação no encruamento sobre cada parcela das perdas. Antes do recozimento, como se esperava as perdas histeréticas a 9% se apresentam mais elevadas, devido ao encruamento e o aumento da densidade de discordâncias, também podemos concluir a influência da espessura, obtendo uma reta crescente.

Após o tratamento térmico, nota-se uma redução das perdas histeréticas, que são muito influenciadas pela microestrutura. Com o aumento do tamanho de grão, eliminação dos defeitos cristalinos e redução do teor de carbono, há uma evidente redução das perdas pela parcela histerética. As perdas parasíticas não sofreram influências após tratamento térmico, visto que são influenciadas pela resistividade e pela espessura.

A Figura 11 mostra os gráficos comparativos de permeabilidade a 1,0T/50Hz, onde podemos observar a influência da condição de processamento, espessura e taxa de deformação nesta propriedade.



**Figura 11.** Permeabilidade a 1,0T/50Hz antes e após o tratamento térmico final.

Antes do tratamento térmico a taxa de deformação piora a permeabilidade, que é a medida da facilidade com que o fluxo magnético atravessa o material, isso se deve ao fato do encruamento, que gera obstáculos para a movimentação das paredes do domínio. Após o tratamento térmico, com o aumento do tamanho de grão devido a recristalização do material no recozimento, há uma melhora da permeabilidade a 9% de deformação, pois como o tamanho de grão é maior, a passagem do fluxo magnético é facilitada. Quanto à espessura da chapa, não houve diferença significativa, confirmando que a permeabilidade não tem efeito com a redução da espessura.<sup>(4)</sup>

## 5 CONCLUSÃO

Os resultados mostram que, a condição de processamento 1 e 2 que representa a espessura de 0,45 mm com 5% e 9% de deformação no encruamento respectivamente tiveram melhor resultados quanto as propriedades magnéticas, ou seja, uma maior redução das perdas parasíticas. Também pode-se concluir que para o fabricante que utiliza o aço de grão não orientado semi-processado com o tratamento final, melhor será o seu desempenho energético com uma maior taxa de deformação na laminação de encruamento.

## Agradecimentos

Durante o desenvolvimento deste projeto contamos com os auxílios técnicos e financeiros do Centro de Pesquisas da CSN.

## REFERÊNCIAS

- 1 CASTRO, N.A, LANDGRAF, CAMPOS M.F. de, Efeito de pequenas deformações e do recozimento em chapas de aço elétrico de grão não orientado.
- 2 LANDGRAF, F.J.G.. Aços Carbono e Aços Silício Para Fins Elétricos. Curso organizado pelo Laboratório de Metalurgia do Pó e Materiais Magnéticos do IPT. São Paulo, 14 a 16 de Junho de 2000.
- 3 CARDOSO, R.F.de.A.. Influência do tamanho de grão e das adições de Si e Mn nas propriedades magnéticas dos aços elétrico de grão não orientado com 3% de Si. Tese de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, 2005.
- 4 CAMPOS, M.F. de. Microestrutura, textura e propriedades magnéticas em aços elétricos. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.