

## INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE PROCESSO DE RECOZIMENTO EM CAIXA E LAMINAÇÃO DE ENCRUAMENTO NAS PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DE AÇO AO CARBONO LAMINADO A FRIO \*

Rafael Masulck Santos <sup>1</sup>  
Eliane Guedes de Carvalho <sup>2</sup>  
Gláucio Soares da Fonseca <sup>3</sup>  
Andersan dos Santos Paula <sup>4</sup>

### Resumo

Este trabalho tem o intuito de correlacionar as principais variáveis dos processos de Recozimento em Caixa e Laminação de Encruamento com as características magnéticas de aços Laminados a frio para fins elétricos de grãos não orientados destinados às aplicações “totalmente processadas” e “semi processados”. Foram utilizadas diferentes temperaturas e tempos de encharque, e posteriormente distintos passes de redução no processo de Encruamento. As microestruturas resultantes das variações dos parâmetros de processo foram analisadas e correlacionadas com as características magnéticas obtidas por ensaio Epstein.

**Palavras-chave:** Aço Elétrico, Propriedade Magnética, Recozimento em Caixa, Laminação de Encruamento.

### BATCH ANNEALING AND TEMPER MILL PROCESS VARIABLES INFLUENCE IN THE CARBON STEEL COLD-ROLLED MAGNETIC PROPERTIES

#### Abstract

This work is intended to relate the main variables of batch Annealing processes and temper mill process with the magnetic characteristics of steel cold rolled for electrical purposes grains not geared for applications "completely processed" and "semi-processed". Different Soaking temperatures and Soaking times were used, and then passes distinct reduction in the temper mill process. The microstructures resulting from variations of process parameters were analyzed and correlated with the magnetic characteristics obtained by Epstein test.

**Keywords:** Electric steel; Magnetic property; Batch Annealing; Temper mill process.

<sup>1</sup> Engenheiro Metalurgista. Mestrando em Engenharia Metalúrgica. Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica (PPGEM), Universidade Federal Fluminense (UFF), Volta Redonda, RJ. Engenheiro de Produção. Companhia siderúrgica nacional (CSN), Volta Redonda, RJ.

<sup>2</sup> Engenheira de Produção. Engenheira de desenvolvimento. Centro de pesquisas, Companhia siderúrgica Nacional (CSN), Volta Redonda, RJ.

<sup>3</sup> Engenheiro Químico, Mestre e Doutor em Engenharia Metalúrgica, Professor do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda da UFF e do Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica (PPGEM)

<sup>4</sup> Engenheira Metalurgista, Mestre e Doutora em Ciência dos Materiais, Professora da Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais (SE/4) e do Programa de Pós-graduação em Ciência dos Materiais (PGCM), Instituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro / RJ; orientadora credenciada do PPGEM/UFF, Volta Redonda / RJ.

## 1 INTRODUÇÃO

Os aços elétricos laminados a frio de classe ABNT 1006/1008 de grãos não orientados (GNO) são as mais utilizadas no mercado nacional em motores elétricos de médio e pequeno porte, representando elevada demanda de aços planos para as usinas siderúrgicas <sup>(1)</sup>. Esses aços possuem 0,06 a 0,08 % de carbono, silício residual e menores propriedades magnéticas em comparação com as outras classes, porém, são utilizados em larga escala por serem os aços planos de mais baixo custo.

O foco deste trabalho está concentrado nessa classe, onde foi possível analisar a influência das variáveis de processo de recozimento em caixa e laminação de encruamento nas características finais do material, correlacionando-as com as propriedades magnéticas.

Usualmente a Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) produz aços para fins elétricos de “Baixa Eficiência” do tipo GNO com recozimento em processo contínuo. No entanto, como alternativa para flexibilização de processo de tratamento térmico, no desenvolvimento deste projeto houve a utilização da rota do recozimento em caixa como processo de recozimento.

É válido ressaltar, que o foco desse trabalho foi a análise de materiais com as mesmas condições de refino de impurezas do metal líquido, temperaturas de laminação a quente, redução a frio, porém, com variações em parâmetros de processo de recozimento em caixa e laminação de encruamento.

O recozimento é fundamental para a melhoria das propriedades magnéticas, pois é responsável pela remoção das tensões associadas à deformação plástica, além de promover o crescimento de grão após a recristalização, conforme proposto por Burke e Turnbull nas “leis da recristalização” <sup>(2)</sup>.

O tamanho de grão é uma variável fundamental para as características magnéticas, pois, os contornos de grão atuam como centros de aprisionamento de paredes de domínios magnéticos e, conseqüentemente, ocasionam uma piora das propriedades magnéticas <sup>(3)</sup>.

O principal objetivo do processo de laminação de encruamento para os aços elétricos GNO da classe “semi processados”, é aumentar a energia interna do material a partir de elevada deformação, onde, a geração de discordâncias é a força motriz para promover a recristalização e o crescimento de grão no recozimento final no cliente (beneficiador de bobinas de aço).

No caso de aços elétricos GNO da classe “totalmente processados”, a deformação aplicada no processo de laminação de encruamento deverá ser de níveis mínimos para propiciar a melhoria na qualidade superficial, sem gerar elevados graus de encruamento, já que o cliente final (beneficiador de bobinas de aço) não irá praticar recozimento com o intuito de promover a recuperação da estrutura encruada, recristalização e crescimento de grão, onde, nesse caso a deformação é prejudicial as propriedades magnéticas <sup>(4)</sup>.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Material

O material objeto desse estudo foi o aço laminado a frio ABNT 1006 com espessura final 0,60 mm e largura final 1200 mm, tratado termicamente via processo de

recozimento em caixa com alongamento final no processo de laminação de encruamento.

Após processo de lingotamento contínuo, as placas foram laminadas a quente com temperatura de acabamento entre 870°C e 910°C e temperatura de bobinamento entre 650°C e 680°C em formas de chapas com espessura de 2,70 mm e largura 1200 mm.

As bobinas oriundas da laminação a quente foram sujeitas a reduções a frio de 70%, onde foram obtidas bobinas com dimensional nominal de 0,60 mm de espessura e largura de 1200 mm a partir de bobinas de 2,70 mm de espessura e largura 1200 mm, conforme citado anteriormente.

## 2.2. Métodos

Foram avaliadas 2 (duas) temperaturas de encharque (700 e 720°C) para o recozimento em caixa, onde para cada uma delas foram adotados 4 (quatro) diferentes tempos de encharque (8 h, 12 h, 18 h e 24 h).

Com o intuito de produzir o material na condição “semi processado”, foram utilizadas deformações de 4% e 7%. Nesse caso, o tratamento térmico final foi simulado em forno de recozimento piloto com aquecimento lento, seguindo por um encharque a aproximadamente 800°C por 2 h em atmosfera 90% Nitrogênio e 10% Hidrogênio. Essa condição será descrita nesse trabalho como aços “Com tratamento térmico” (CTT) final.

Com o intuito de produzir o material na condição “totalmente processado”, foi utilizada deformação de 0,2% e 0,4%. Nesse caso, não foi feito tratamento térmico final em forno piloto. Essa condição será descrita nesse trabalho como aços “Sem tratamento térmico” (STT) final.

Cada “bobina Final” teve como representação 1 (uma) amostra. Cada amostra foi utilizada para geração dos “Corpos de Prova” (laminas) para ensaio Epstein nas situações: (i) Sem tratamento térmico (STT); e (ii) Com tratamento térmico (CTT) no forno piloto.

### 2.2.1 Caracterização magnética por ensaio Epstein.

Cada ensaio Epstein utilizou conjunto composto por 24 laminas, sendo 12 lâminas na direção transversal (DT) de laminação e 12 lâminas na direção longitudinal (DL) de laminação, obtendo valores referentes a perda magnética total, perda histerética, perda dinâmica e permeabilidade.

Foram utilizadas para esse trabalho a demonstração dos resultados de propriedades magnéticas com induções de 1,5 T em frequência de 60 Hz.

### 2.2.2 Caracterização mecânica da Dureza Vickers

Após o ensaio Epstein, os “Corpos de Prova” (laminas) foram utilizados para a caracterização mecânica da dureza Vickers.

Os corpos de prova para o ensaio de dureza Vickers foram submetidos à preparação com lixas de granulometria com a numeração crescente de 220 a 1200, a fim de obter uma superfície mais lisa e plana. O ensaio foi executado com indentador a base de aço e carga de 5 kgf e os resultados oriundos de uma média de três análises por condição de processamento.

### 2.2.3. Tamanho de grão

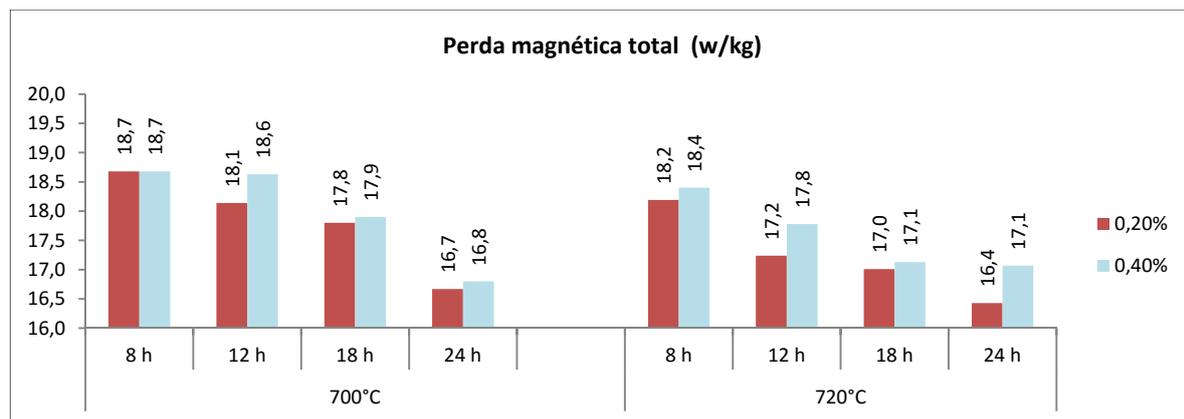
Após o ensaio Epstein, os “Corpos de Prova” (laminas) foram utilizados para a caracterização microestrutural em relação ao Tamanho de grão.

A análise microestrutural foi realizada por um microscópio óptico, as amostras foram embutidas e submetidas à preparação pelo método convencional de lixamento e polimento mecânico, e ao final ataque com Nital 3% para contraste da microestrutura. Para determinação do tamanho de grão foi utilizado o método dos interceptos de Heyn conforme a norma ASTM E112:1996, através da contagem dos interceptos dos contornos de grãos sobre um segmento de comprimento conhecido. O aumento utilizado foi de 100 vezes.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Resultados dos testes sem tratamento térmico posterior (STT)

Conforme pode ser observado na Figura 1, os menores valores de perdas magnéticas foram observados em condições de maiores tempos de encharque. Os resultados das perdas após deformações de 0,4% foram piores do que com deformações de 0,2%, ou seja, apresentam valores de perda magnética superiores. Para uma mesma condição de tempo e deformação, observa-se, na maioria dos casos, que menores valores de perdas ocorrem quando a temperatura de encharque foi de 720°C.



**Figura 1:** Variação das perdas magnéticas totais após recozimento em caixa com diferentes tempos e temperaturas de encharque e deformação de 0,2% e 0,4 % no processo de encruamento.

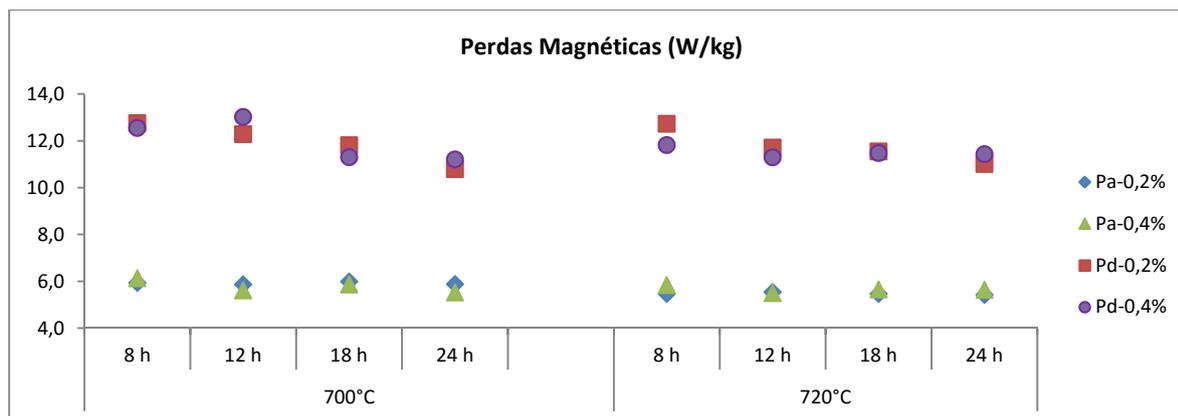
A parcela das perdas totais referentes às perdas histeréticas ( $P_h$ ) foram mais representativas do que a parcela referente às perdas dinâmicas ( $P_d$ ). Conforme pode ser observado na Figura 2, quanto maior o tempo de encharque, menor foi a parcela histerética das perdas, seguindo o comportamento das perdas totais.

Conforme pode ser observado na Figura 3, os valores de Permeabilidade magnética tende a aumentar com maiores tempos de encharque.

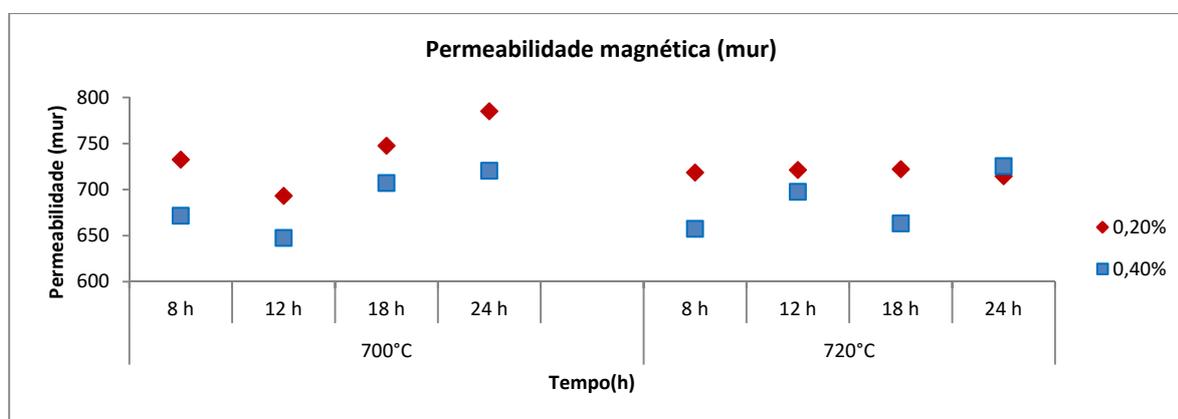
A menor deformação de 0,2% impactou em maior valor absoluto de permeabilidade. A alteração da temperatura de encharque gerou pouco efeito nos valores de permeabilidade.

Na Figura 4 é mostrado que o aumento do tempo de encharque gerou aumento do tamanho de grão, sendo o principal responsável pela melhoria das propriedades magnéticas mostradas nas Figuras de 1 a 3.

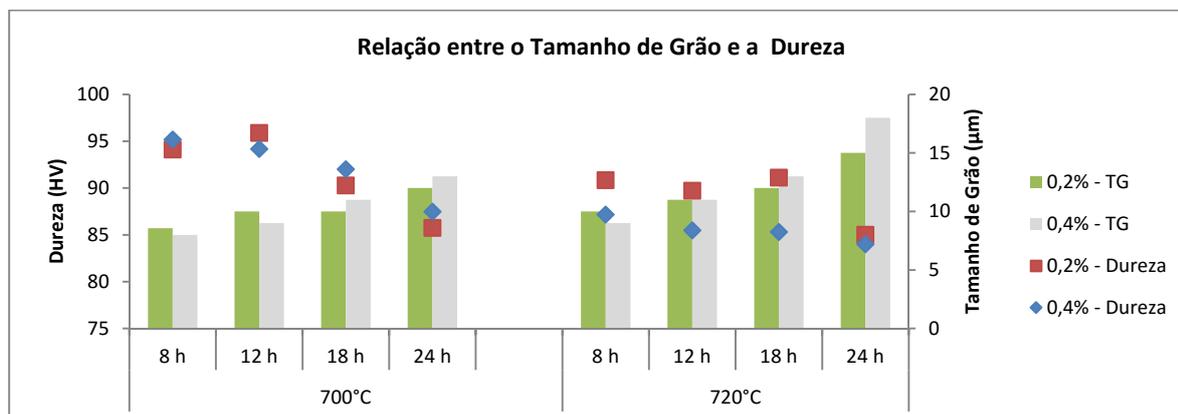
Também como consequência do aumento do tamanho de grão, tem-se a redução proporcional da dureza, em função das menores reduções adotadas no processo de encruamento (0,2 e 0,4%).



**Figura 2:** Variação das perdas magnéticas histeréticas e perdas magnéticas dinâmicas após recozimento em caixa com diferentes tempos e temperaturas de encharque e deformação de 0,2% e 0,4% no processo de encruamento.

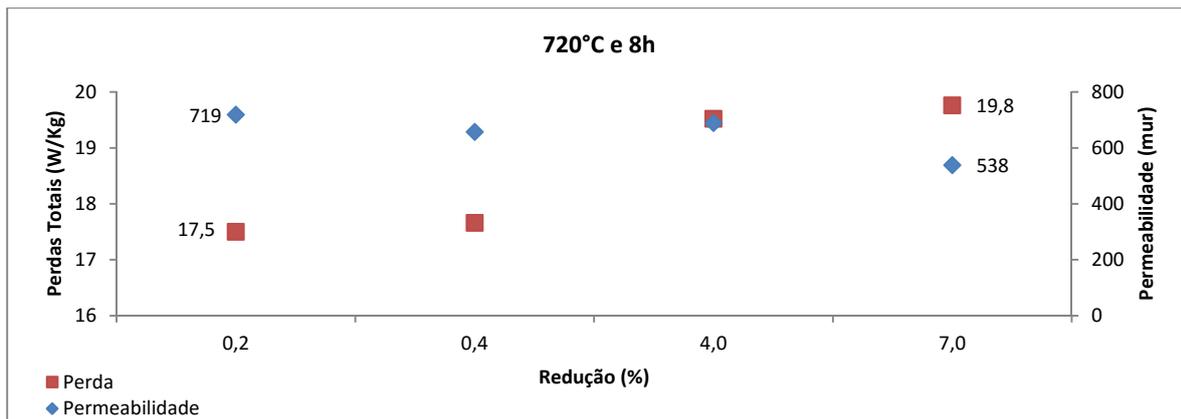


**Figura 3:** Variação da permeabilidade magnética após recozimento em caixa diferentes tempos e temperaturas de encharque e deformação de 0,2% e 0,4% no processo de encruamento.



**Figura 4:** Variação da dureza Vickers e tamanho de grão após recozimento em caixa com diferentes tempos e temperaturas de encharque e deformação de 0,2% e 0,4% no processo de encruamento.

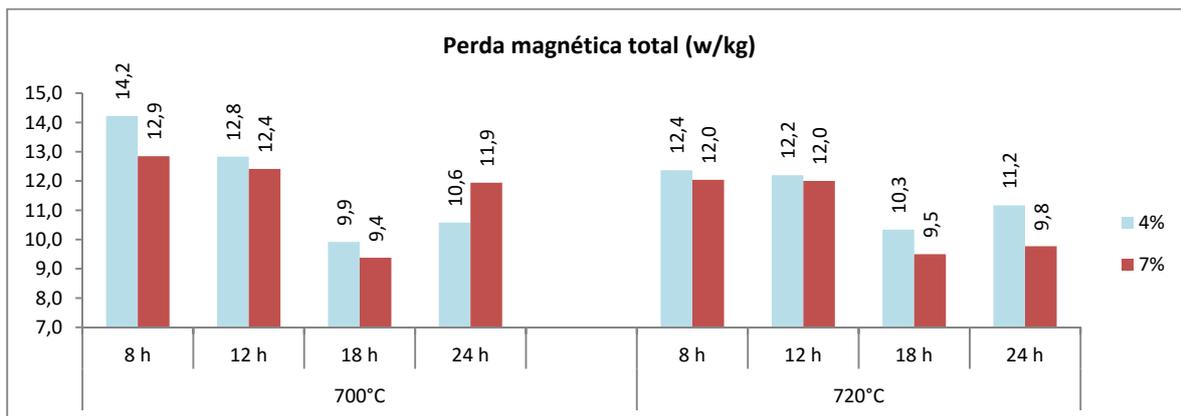
O aumento da deformação gerou redução da permeabilidade e aumento das perdas, ressaltando o impacto negativo para as propriedades magnéticas. Esse fenômeno pode ser confirmado na Figura 5, que representa a situação com diferentes deformações após recozimento em caixa com encharque a 720°C por 8 h.



**Figura 5:** Variação das perdas magnéticas totais e permeabilidade magnética após recozimento em caixa com temperaturas de encharque de 720°C, tempos de encharque de 8 h, com deformações de 0,2%, 0,4%, 4% e 7% no processo de encruamento.

### 3.2. Resultados dos testes com tratamento térmico posterior (CTT)

Analisando o impacto do tempo de encharque (anterior da deformação e tratamento térmico final), observa-se o decréscimo das perdas até 18 h de encharque, porém, com 24 h de encharque as perdas estabilizaram ou tiveram leve aumento, conforme pode ser observado na Figura 6.



**Figura 6:** Variação das perdas magnéticas totais e dureza Vickers após recozimento em caixa com diferentes tempos e temperaturas de encharque e deformação de 4 % e 7% no processo de encruamento. Todas as condições com tratamento térmico após encruamento.

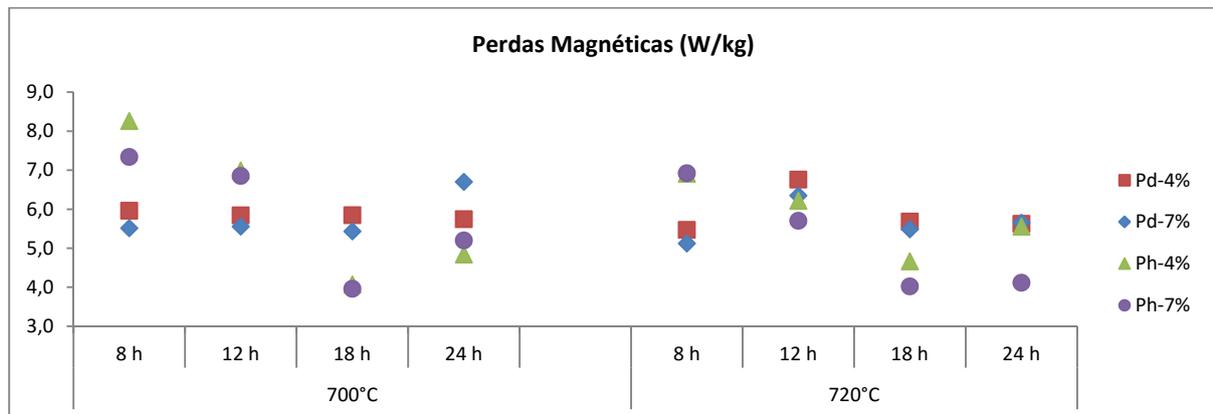
Os resultados das perdas após deformações de 7% foram melhores do que com deformações de 4%, reforçando a importância de aplicar elevadas deformações do processo de encruamento.

Para uma mesma condição de tempo e deformação, observa-se menores valores de perdas quando a temperatura de encharque foi de 720°C, exceto para o tempo de encharque de 18 h para ambas deformações de 4 e 7% e para 24 h de encharque associada a deformação de 4%.

A parcela das perdas totais referentes as perdas histeréticas (Ph) foram pouco representativas em relação a parcela referente as perdas dinâmicas (Pd) e apresentam comportamento semelhante as perdas totais.

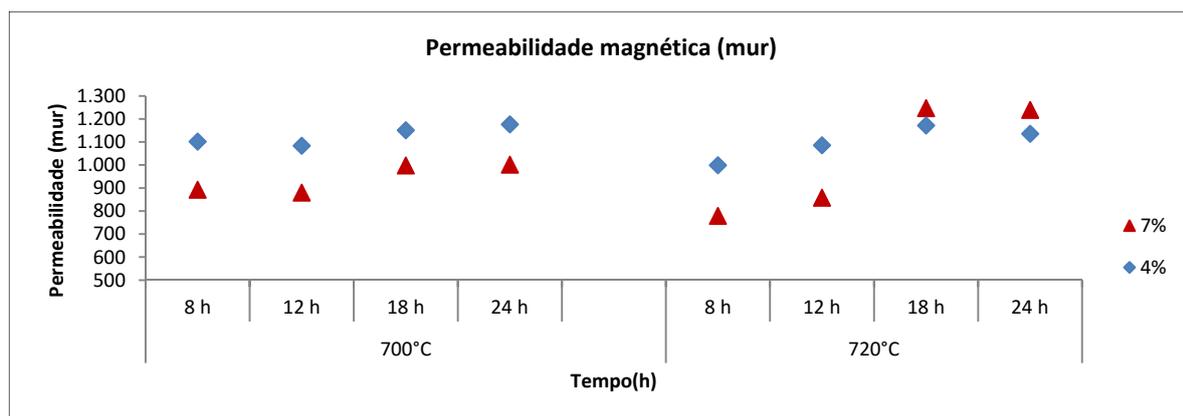
Observa-se o decréscimo das perdas histeréticas (Ph) até 18 h de encharque, porém, com 24 h de encharque as Perdas histeréticas (Ph) e Perdas Dinâmicas (Pd)

estabilizaram ou tiveram leve aumento. A variação das componentes das perdas pode ser avaliada na Figura 7.



**Figura 7:** Variação das perdas magnéticas histeréticas e perdas magnéticas dinâmicas após recozimento em caixa diferentes tempos e temperaturas de encharque e deformação de 2% e 4% no processo de encruamento. Todas as condições com tratamento térmico após encruamento.

Conforme pode ser observado na Figura 8, os valores de Permeabilidade magnética tende a aumentar com maiores tempos de encharque.

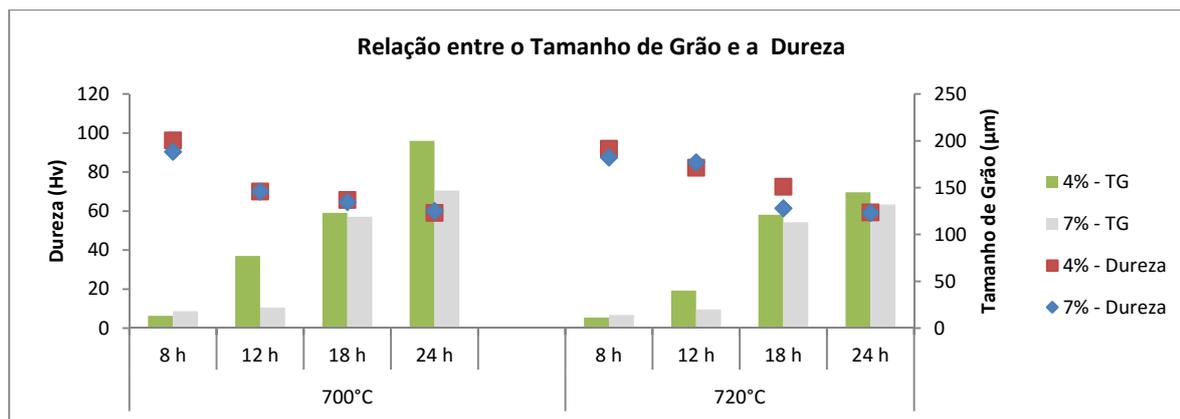


**Figura 8:** Variação da permeabilidade magnética após recozimento em caixa diferentes tempos e temperaturas de encharque e deformação de 4% e 7% no processo de encruamento. Todas as condições com tratamento térmico após encruamento.

Os maiores valores de permeabilidade foram obtidos nas condições de maior tempo de encharque, maiores temperaturas de encharque e maior deformação.

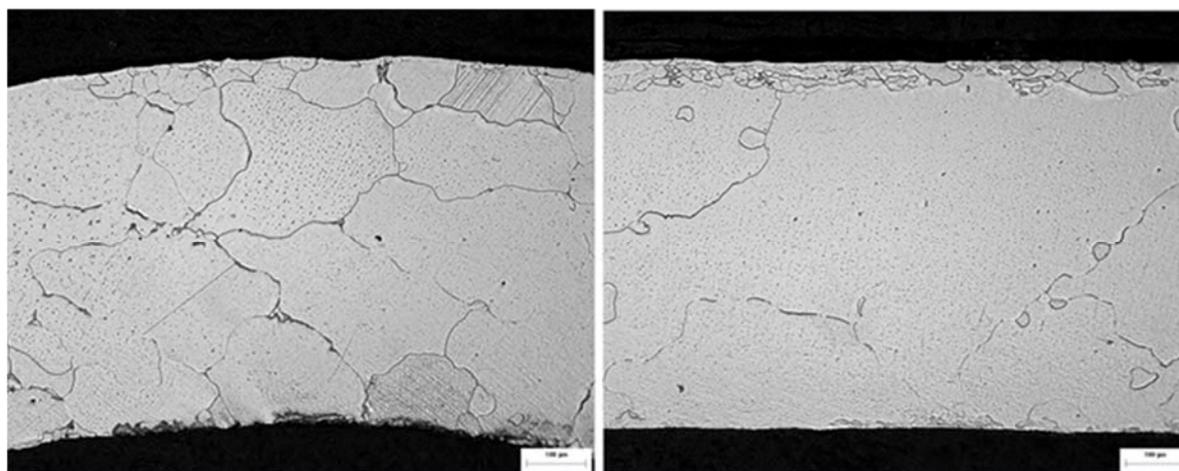
A alteração da temperatura de encharque gerou pouco efeito nos valores de permeabilidade.

Na Figura 9 é mostrado que o aumento do tempo de encharque gerou aumento do tamanho de grão, conseqüentemente, a redução proporcional da dureza, em função das maiores reduções adotadas no processo de encruamento (4 e 7%).

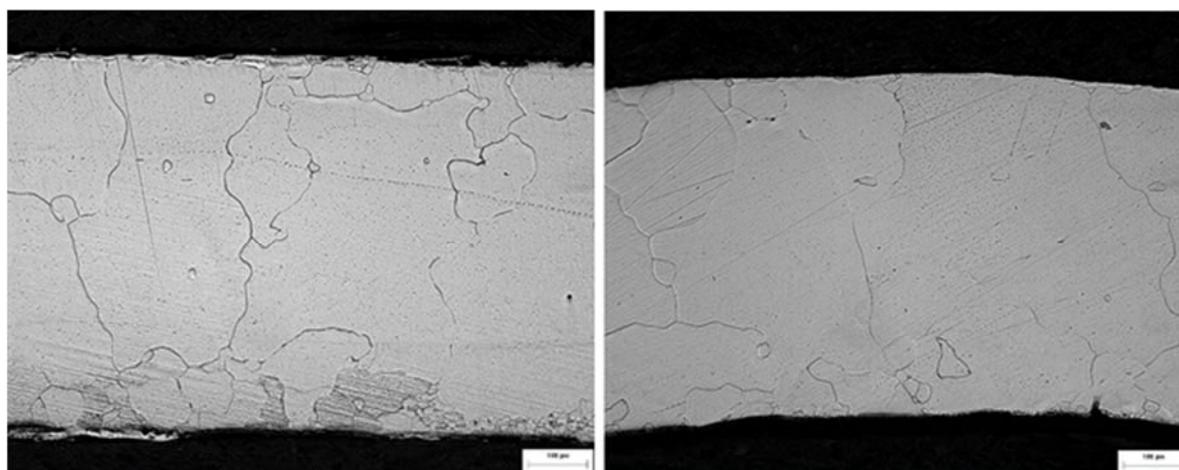


**Figura 9:** Variação da dureza Vickers e tamanho de grão após recozimento em caixa com diferentes tempos e temperaturas de encharque e deformação de 4% e 7% no processo de encruamento. Todas as condições com tratamento térmico após encruamento.

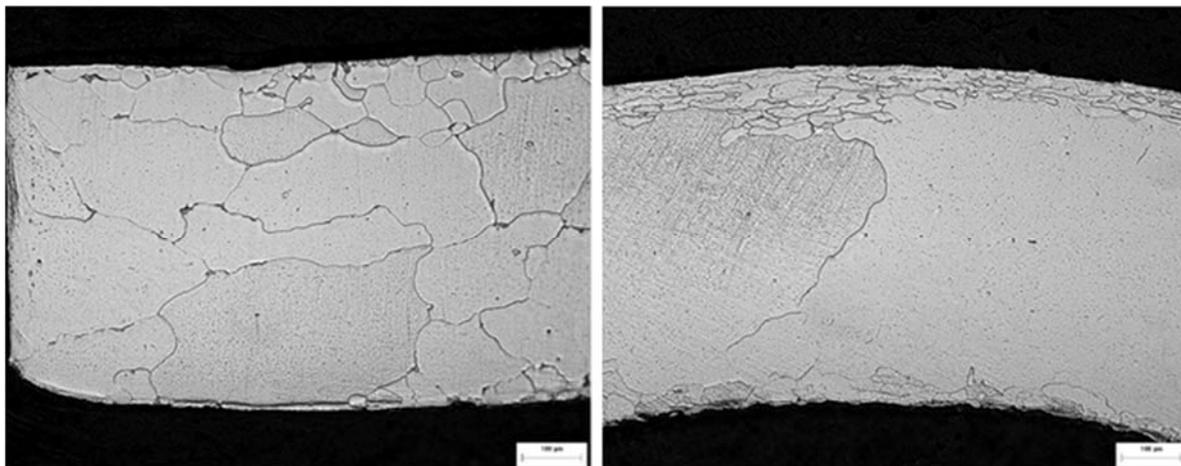
A evolução microestrutural nas condições com aumento mais expressivo de tamanho de grão, 24 h de encharque, são comparadas ao tempo de 18 h de encharque nas mesmas temperaturas, podem ser observadas nas Figuras de 10 a 13.



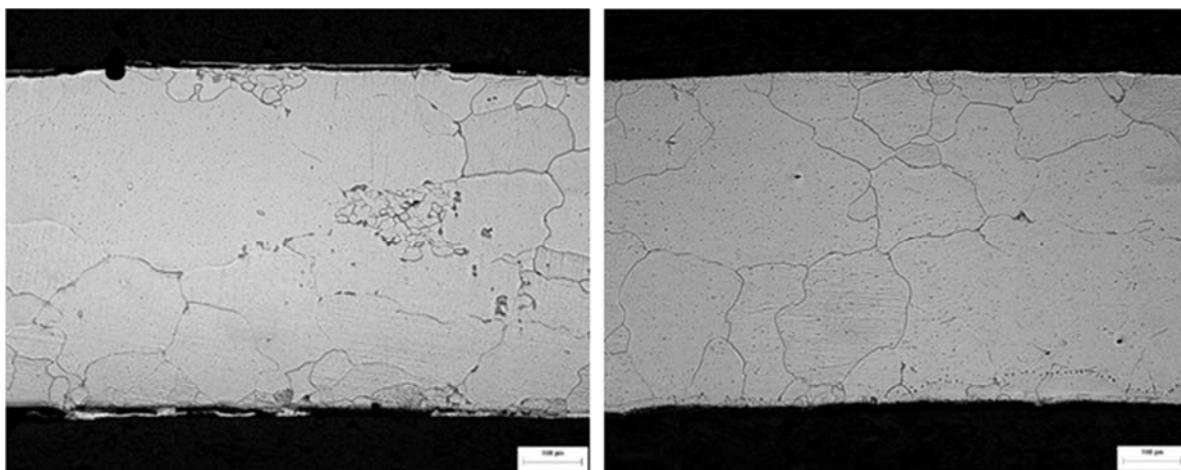
**Figura 10:** Evolução microestrutural das amostras deformadas com 4%. Na sequência, da esquerda para direita, 700°C com 18 h e 700°C com 24 h.



**Figura 11:** Evolução microestrutural das amostras deformadas com 4%. Na sequência, da esquerda para direita, 720°C com 18 h e 720°C com 24 h.

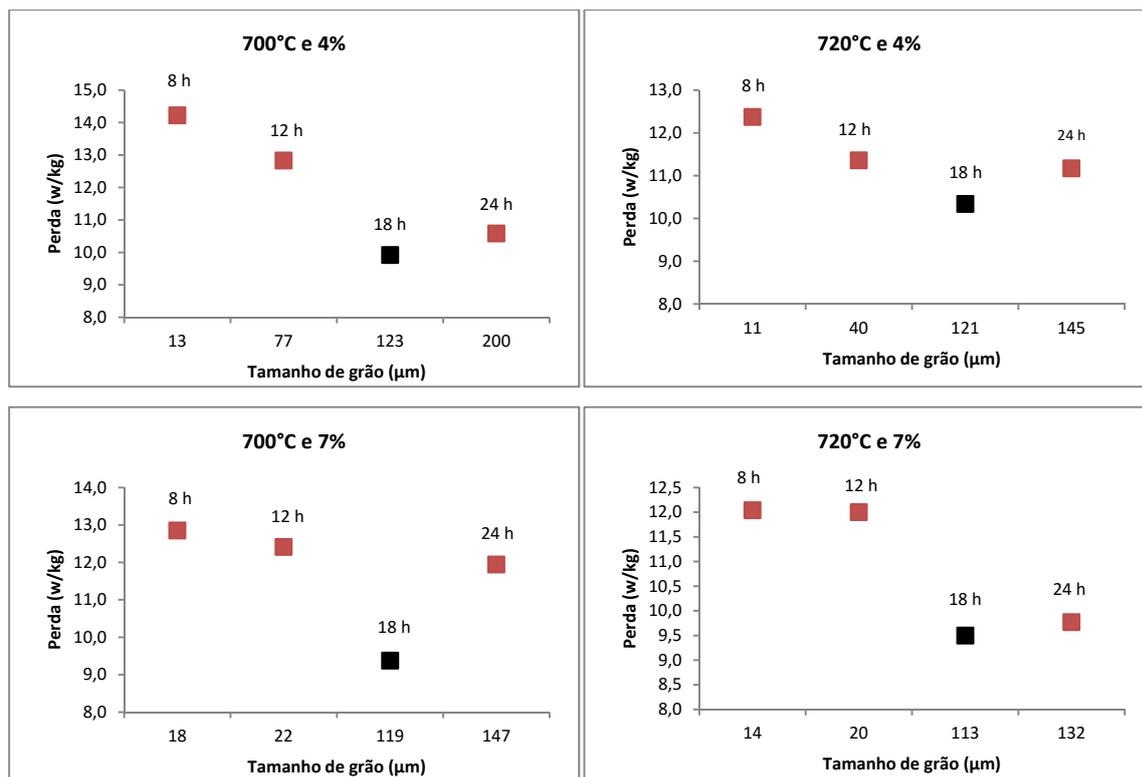


**Figura 12:** Evolução microestrutural das amostras deformadas com 7%. Na sequência, da esquerda para direita, 700°C com 18 h e 700°C com 24 h.

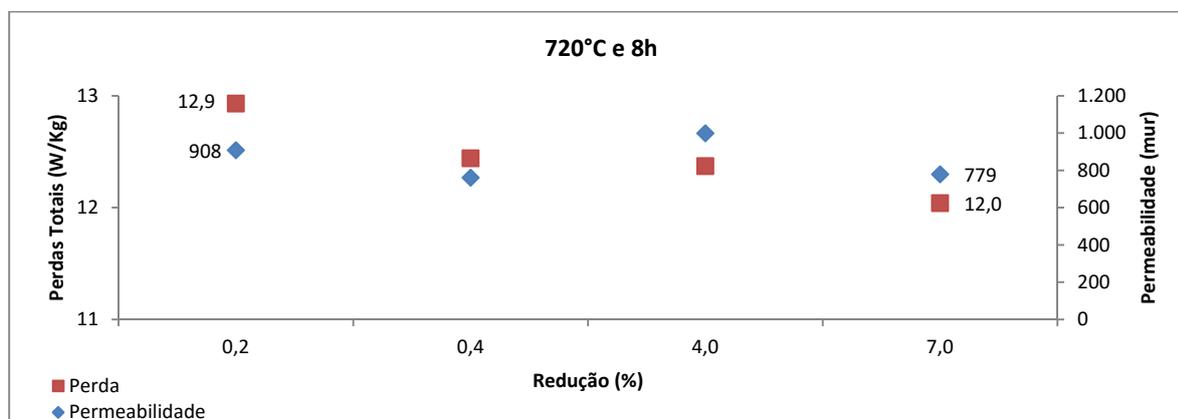


**Figura 13:** Evolução microestrutural das amostras deformadas com 7%. Na sequência, da esquerda para direita, 720°C com 18 h e 720°C com 24 h.

Na Figura 14 é demonstrado que os melhores resultados de perda magnética ocorrem com tamanhos de grão entre 110 µm e 130 µm. Essa condição foi obtida com tempos de encharque de 18 h. Após esse tempo de encharque, o tamanho de grão continua a crescer, porém, os valores de perda voltam a subir ou estabilizar. O efeito do aumento da deformação, anterior ao tratamento térmico final, pode ser observado na Figura 15, onde esta representa a situação com encharque a 720°C por 8 h, seguido por tratamento térmico posterior.



**Figura 14:** Relação entre as perdas magnéticas e o tamanho de grão em diferentes condições de tempo de encharque, temperatura de encharque e deformação.



**Figura 15:** Variação das perdas magnéticas totais e permeabilidade magnética após recozimento em caixa com temperaturas de encharque de 720°C, tempos de encharque de 8 h, com deformações de 0,2%, 0,4%, 4% e 7% no processo de encruamento e tratamento térmico final.

## 4 CONCLUSÃO

No caso dos aços sem tratamento térmico posterior (STT) as propriedades magnéticas apresentaram melhores resultados com o aumento do tempo de encharque, ou seja, um decréscimo das perdas magnéticas e incremento da permeabilidade magnética.

Com o aumento da deformação, mesmo a baixos níveis como 0,4%, os valores absolutos das perdas magnéticas aumentaram e da permeabilidade diminuíram, indicando o efeito negativo da deformação final para as propriedades magnéticas dos aços sem tratamento térmico posterior (STT).

Foi concluído que o aumento do tamanho de grão (devido maiores tempos de encharque), associado a menores níveis de deformações devem ser visados para a obtenção de aços do tipo “Totalmente processados” aplicados sem tratamento térmico (STT) final.

No caso dos aços com tratamento térmico (CTT) posterior as deformações de 4% e 7%, conclui-se que o aumento do tamanho de grão foi benéfico para as propriedades magnéticas até valores entre 110  $\mu\text{m}$  e 130  $\mu\text{m}$ , obtidos com tempos de encharque no recozimento em caixa próximo a 18 h. Com o aumento do tempo para 24 h, observou-se maior tamanho de grão final, porém, redução da perda magnética e da manutenção da permeabilidade magnética. Esse fenômeno indicou a existência de tamanho de grão crítico entre 110  $\mu\text{m}$  e 130  $\mu\text{m}$ .

As deformações de 4% e 7% contribuíram diretamente para a obtenção de elevados tamanhos de grão após o tratamento térmico final, sendo os resultados de propriedades dos materiais levemente melhores para os casos processados com a deformação de 7%.

Foi concluído que tempos de encharque próximo a 18 h e reduções próximas a 7% na laminação de encruamento, devem ser visados para a obtenção de aços do tipo “Semi processados” aplicados com tratamento térmico (CTT) final.

Os resultados obtidos indicam que existe viabilidade técnica para que o processo de recozimento em caixa produza aços elétricos do tipo “semi processados” e “totalmente processados”.

## Agradecimentos

A todos os profissionais da CSN que tiveram participação nesse trabalho, em especial ao Eng. Odilei Max da Silva, Eng. Antonio Leonardo dos Santos, equipes de laboratórios, de produção, área técnica e desenvolvimento de produtos.

## REFERÊNCIAS

- 1 LANDGRAF, F.J.G. Propriedades magnéticas de aços para fins elétricos. Aços: perspectivas para os próximos 10 anos. Rio de Janeiro, 2002.
- 2 J.E. BURKE e D. TURNBULL, Recrystallization and grain growth. In: Progress in Metal Physics. Pergamon Press, vol.3, London, 1952, pp.220-292.
- 3 LANDGRAF, F. J. G. Lâminas de aço para motores elétricos. M & M - Metalurgia e Materiais, São Paulo: v. 55, n. 483, p. 626-627, 1999.
- 4 DUNKLE, R. P.; Goodenow, R. H. Closing the GAP with Electrical Lamination Steels: A Producer's Point of View. Soft and Hard Magnetic Mat. with Applications, p. 41-54, 1986.