

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE RECOZIMENTO SOBRE TAMANHO DE GRÃO E PERDAS MAGNÉTICAS EM CHAPAS DE AÇO ELÉTRICO GRÃO NÃO-ORIENTADO TOTALMENTE PROCESSADOS¹

Diogenes Savi Mondo²

Etiene Benini Mendes³

Vinicius Milani Santos³

Resumo

O presente trabalho consiste em uma análise da temperatura de encharque envolvida na etapa de recozimento ultra-rápido em chapas de aço elétrico grão não-orientado totalmente processado, objetivando assim, estudar a influência que este parâmetro exerce nas propriedades magnéticas e metalúrgicas deste material. Foram utilizadas chapas de aço elétrico grão não-orientado laminadas a frio com 3,2% de silício em peso e espessura de 0,35 mm. Corpos de prova foram confeccionados para ensaios de simulação de recozimento contínuo em um simulador termomecânico Gleeble com atmosfera inerte de gás Hélio injetado em uma câmara em vácuo. Foi variada a temperatura de encharque partindo de 1.000°C até 1.100°C, para tempos de 60 segundos e 120 segundos de encharque, com uma taxa de aquecimento e resfriamento de 25°C/s e 12°C/s, respectivamente. A caracterização das propriedades consistiu em análise de perdas magnéticas e de tamanho de grão. As simulações foram realizadas com êxito. As chapas apresentaram microestrutura ferrítica com grãos totalmente recristalizados e de tamanho heterogêneo. A temperatura de encharque exerceu forte influência sobre o tamanho de grão, com grãos crescendo severamente com o aumento da temperatura para ambos os tempos de encharque, alcançando valores de 170 µm para temperaturas de 1.100°C e 120 segundos. As perdas magnéticas apresentaram comportamento particular, com a presença de um valor ótimo, levemente acima de 2,3 W/Kg, para temperaturas em torno de 1.040°C, para ambos os tempos.

Palavras-chave: Temperatura de encharque; Recozimento; Aço elétrico grão não-orientado; Perdas magnéticas.

INFLUENCE OF SOAKING TEMPERATURE IN TERMS OF GRAIN SIZE AND MAGNETIC LOSSES OF NON-ORIENTED FULLY PROCESSED ELECTRICAL STEEL SHEETS

Abstract

The present work is an analysis of soaking temperature involved during ultra-rapid annealing of non-oriented fully processed electrical steels aiming to study the influence of such parameter in terms of magnetic and metallurgical properties. Non-oriented cold rolled 3.2 % Si and 0.35mm thick electrical steels have been used. Samples were manufactured to perform gleeble simulations in a inert atmosphere of helium gas. It was changed soaking temperature starting from 1000 up to 1100°C, both performed during 60 and 120 seconds. The heating and cooling rates were 25 and 12 °C/s respectively. Properties characterization consisted on magnetic losses and grain size analysis. Simulations were successfully carried out. The microstructure presented ferritic phase and fully recrystallized heterogeneous size grains. The soaking temperature showed itself strong influent about grain size, with grains raising severally while soaking temperature raises, reaching values about 170 µm when performed to 1100 °C and 120 s. Magnetic losses presented particular behaviour, showing a optimum value (around 2.3 W/Kg) for 1040°C as soaking temperature for both soaking times.

Key words: Soaking temperature; Annealing; Non-oriented electrical steels; Magnetic losses.

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

² *MSc. Engenheiro Mecânico – LAMEF / UFRGS.*

³ *Engenheiro Metalúrgico – LAMEF / UFRGS.*

1 INTRODUÇÃO

Dentre os materiais magnéticos, os aços elétricos, ou siliciosos, são os mais utilizados no mundo. No Brasil, estes aços envolvem dois setores importantes da economia: a siderurgia e a indústria da eletricidade. Aproximadamente, um por cento da produção anual de aços é destinado para fins elétricos.

A característica que torna os aços elétricos atrativos para tal aplicação são suas baixas perdas magnéticas. Sucintamente, as perdas representam à dissipação de energia, em forma de calor no processo de inversão da magnetização, ou ainda, a área interna da curva de histerese, que representa a diferença entre a indução magnética (intensidade magnética no interior do material) e a intensidade do campo magnético externo que a criou.⁽¹⁾

As propriedades magnéticas desses materiais são extremamente afetadas por parâmetros tais como: composição química, distribuição e tamanho de precipitados, tamanho de grão, densidade de discordâncias, textura, entre outros.⁽²⁾

Alguns desses parâmetros, como tamanho de grão e textura, afetam acentuadamente as perdas magnéticas e estão diretamente ligados com a etapa do processo de fabricação chamada de recozimento contínuo. Após laminados a quente e a frio, os aços são submetidos a tratamentos térmicos em fornos contínuos de aquecimento com encharque e resfriamento a temperaturas e tempos controlados, parâmetros estes que são variados dependendo do produto final desejado. Essa etapa promove o alívio das tensões provenientes do trabalho a frio e é quando ocorre a recristalização e crescimento de grão do material, garantindo assim propriedades magnéticas e metalúrgicas adequadas. Com o intuito de aumentar a produtividade, buscando ainda melhorar a textura de aços elétricos grão não-orientado, melhorando assim suas propriedades magnéticas, foi desenvolvido e patenteado em 1990, um método chamado de recozimento ultra-rápido contínuo, onde se tornou possível realizar este tratamento térmico na ordem de 50 vezes mais rápido que o recozimento contínuo convencional.⁽³⁾

Este trabalho busca analisar o comportamento das perdas magnéticas em função do parâmetro independente temperatura de encharque, do processo de recozimento ultra-rápido contínuo, em chapas de aço elétrico de grão não-orientado totalmente processado. Para tal, foi utilizado um simulador termomecânico Gleeble, que simula condições reais de uma linha de recozimento ultra-rápido em atmosfera controlada.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho, utilizou-se um aço elétrico GNO laminado a frio de 0,35mm de espessura, denominado M32, onde as Tabelas 1 e 2 apresentam sua composição química, realizada via espectrometria de emissão ótica, e dureza, na escala Vickers (HV) com carga de 200 gf,⁽⁴⁾ respectivamente.

Tabela 1: Porcentagem em peso.

Material	C	Si
M32	0,003	3,22

Tabela 2: Resultados de dureza.

Endentação	1	2	3	4	5	Média±SD
HV	360	354	351	358	356	356±4

Os ensaios de simulação da etapa de recozimento ultra-rápido contínuo foram realizados em um simulador termo/mecânico Gleeble 1500 D. Este simulador é um instrumento que permite a simulação de ciclos térmicos e/ou mecânicos, tais como tratamentos térmicos, soldagem e conformação em uma larga faixa de temperatura.

A Figura 1 mostra, esquematicamente, a geometria e as dimensões propostas dos corpos-de-prova utilizados. Esta geometria e dimensões utilizadas basearam-se em resultados de ensaios realizados previamente com diferentes configurações de geometria/dimensão. As chapas foram dobradas para evitar deformações durante os ensaios. Os experimentos foram realizados em uma atmosfera inerte de gás hélio injetado em uma câmara em vácuo.

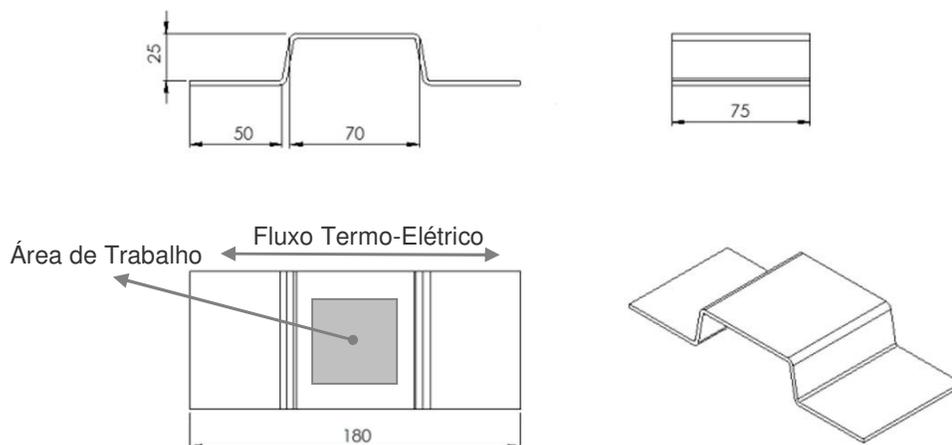


Figura 1: Desenho esquemático indicando a geometria e dimensões propostas dos corpos de prova, bem como a zona de trabalho.

Foi variada a temperatura de encharque partindo de 1000 até 1100 °C, para tempos de 60 segundos e 120 segundos de encharque, com uma taxa de aquecimento e resfriamento de 25 °C/s e 12 °C/s, respectivamente, conforme ilustra a Tabela 3.

Tabela 3: Lista dos ensaios propostos

Código da Amostra	Material	Espessura (mm)	TA (°C/s)	TR (°C/s)	Tmax (°C)	Tench (s)
A1000-120	M32	0,35	25	12	1.000	120
A1020-120					1.020	
A1040-120					1.040	
A1060-120					1.060	
A1100-120					1.100	
A1000-60					1.000	60
A1020-60					1.020	
A1040-60					1.040	
A1060-60					1.060	
A1100-60					1.100	

As perdas magnéticas totais foram medidas segundo a norma DIN EN 60404-2⁽⁵⁾ em um quadro de Epstein padrão com um enrolamento primário responsável pela criação do campo magnético e um enrolamento secundário responsável pela medida da densidade de fluxo magnético nas amostras que formam o núcleo.⁽⁶⁾ Foram puncionadas amostras quadradas de 50 mm de lado para

a realização dos ensaios e estes foram realizados a uma indução magnética máxima de 1,5 T e frequência de 50 Hz. Foi utilizado o software LabVIEW8 para a aquisição dos dados.

Para a análise microestrutural, foram retiradas amostras de todos os ensaios na seção longitudinal à direção de laminação das chapas exatamente na região onde foram soldados os termopares. Estas foram preparadas segundo a norma NBR13284⁽⁷⁾ e atacada com nital 4% segundo a norma NBR8108.⁽⁸⁾ Após, cinco micrografias de distintas regiões foram obtidas em um microscópio ótico AXIOVERT 200M MAT com uma câmera ZEISS acoplada ao software AXIOVION 4.5. Para a medição do tamanho de grão a Norma ASTM E112-96⁽⁹⁾ do método de interceptação linear foi utilizada. Foram assumidos grãos equiaxiais para a determinação do seu valor físico.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Ensaios Gleeble

As simulações foram realizadas com sucesso. Para os gráficos de temperatura versus tempo adquiridos dos termopares, os ciclos começam em temperaturas por volta dos 35°C devido ao aquecimento, remanescente de um ensaio para outro das garras de cobre que suportam os corpos de prova. Para muitos casos, estes ciclos foram interrompidos em qualquer temperatura abaixo do patamar de 400°C, visto que abaixo desse valor, nenhuma mudança microestrutural ocorre nesses materiais. A Figura 2 apresenta o ciclo térmico para a amostra do grupo A código A1000-120.

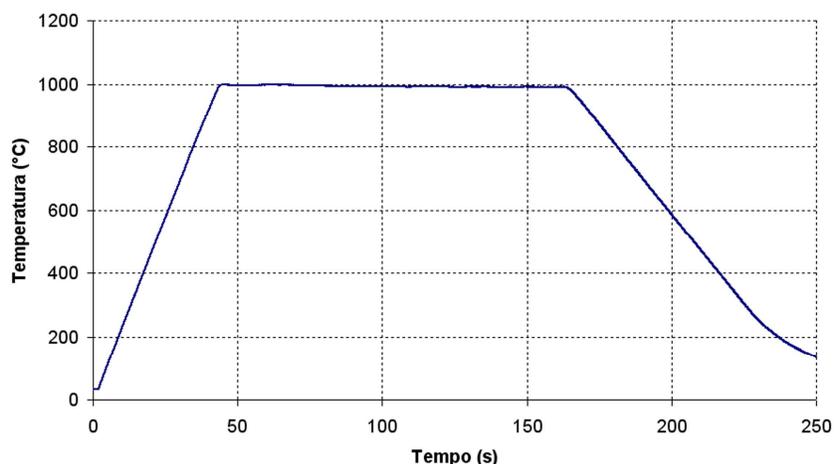


Figura 2: Ciclo térmico realizado para a amostra A1000-120 ($T_A=25^\circ\text{C/s}$, $T_{\text{max}}=1.000^\circ\text{C}$, $t_{\text{ench}}=120\text{s}$ e $TR=12^\circ\text{C/s}$).

3.2 Análise Metalográfica

As chapas apresentaram microestrutura ferrítica, devido aos teores extremamente baixos de carbono nos materiais e a presença de silício que estabiliza a ferrita. Observaram-se claramente os contornos de grão totalmente recristalizados com tamanho heterogêneo, conforme exemplifica a micrografia da Figura 3, retirada da amostra código A1000-120.

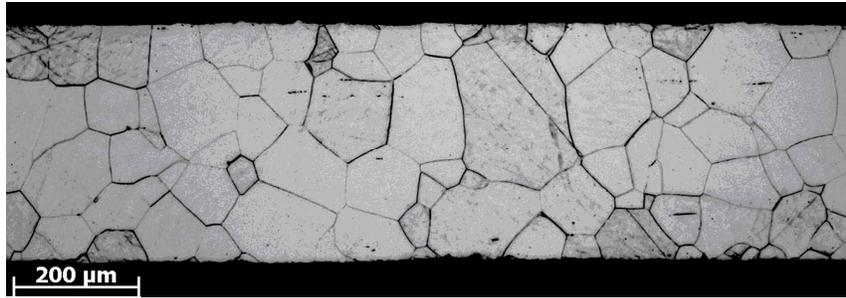


Figura 3: Micrografia da amostra A1000-120 apresentando microestrutura ferrítica com grãos recristalizados e de tamanho heterogêneo.

3.3 Correlação dos Resultados de Perda Magnética e Tamanho de Grão

As Figuras 4 e 5 apresentam comportamento similares do TG e P15 em função da temperatura de encharque (T_{max}), para as amostras ensaiadas com tempo de encharque de 120 e 60 segundos, respectivamente.

Para ambos, o diâmetro dos grãos recristalizados tende a crescer com o aumento da T_{max} de recozimento. No entanto, a Figura 6 mostra que os grãos são sempre maiores para $t_{ench}=120$ s em comparação com tempo de encharque reduzido pela metade. O diâmetro médio dos grãos varia de aproximadamente 90 μm até 160 μm para simulações realizadas com temperaturas de recozimento entre 1.000 $^{\circ}C$ a 1.100 $^{\circ}C$

Já as perdas magnéticas apresentaram os menores valores para recozimentos realizados a 1.040 $^{\circ}C$, em torno de 2,4 W/Kg e 2,3 W/Kg para t_{ench} de 120 e 60 s, respectivamente. Este comportamento de perdas magnéticas pode estar relacionado com o fato destes aços possuírem tamanho de grão ótimo, uma vez que quanto maior o tamanho de grão, menor será a parcela histerética, porém crescem as perdas em excesso.⁽¹⁾ Este TG ótimo estaria em torno de 110 μm para as amostras ensaiadas, estando assim dentro da faixa de TG ótimo mencionada na literatura, que está entre 100 μm e 150 μm .^(1,10)

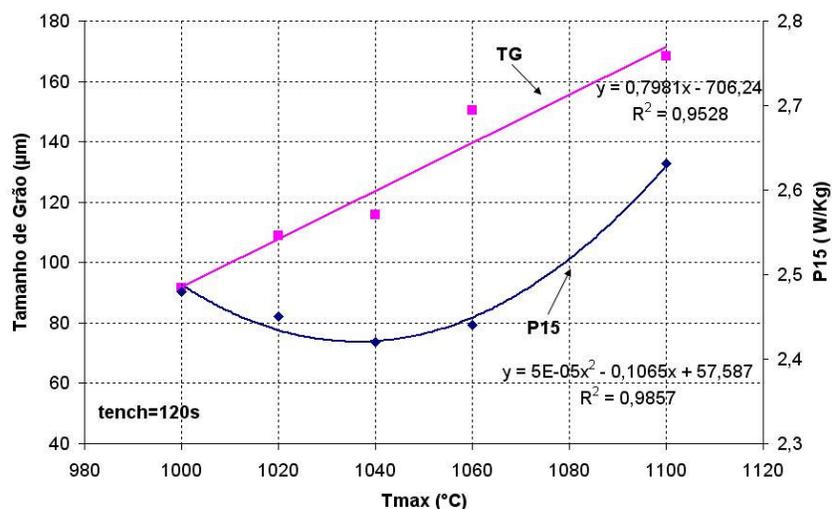


Figura 4: TG e P15 em função de T_{max} para t_{ench} de 120 s (M32, 0,35 mm espessura, $T_A=25^{\circ}C/s$, $T_R=12^{\circ}C/s$, $T_{max}=1.000^{\circ}C$, $1.020^{\circ}C$, $1.040^{\circ}C$, $1.060^{\circ}C$ e $1.100^{\circ}C$).

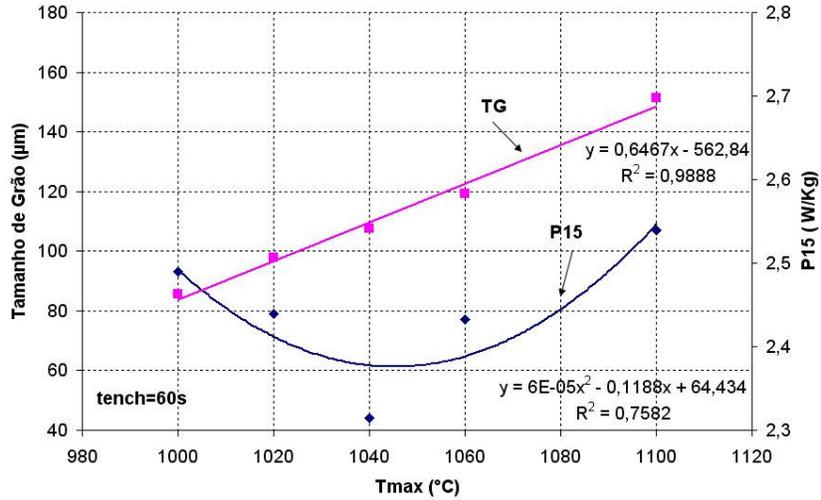


Figura 5: TG e P15 em função de Tmax para tench de 60 s (M32, 0,35 mm espessura, TA=25°C/s, TR=12°C/s, Tmax= 1.000°C, 1.020°C, 1.040°C, 1.060°C e 1100°C).

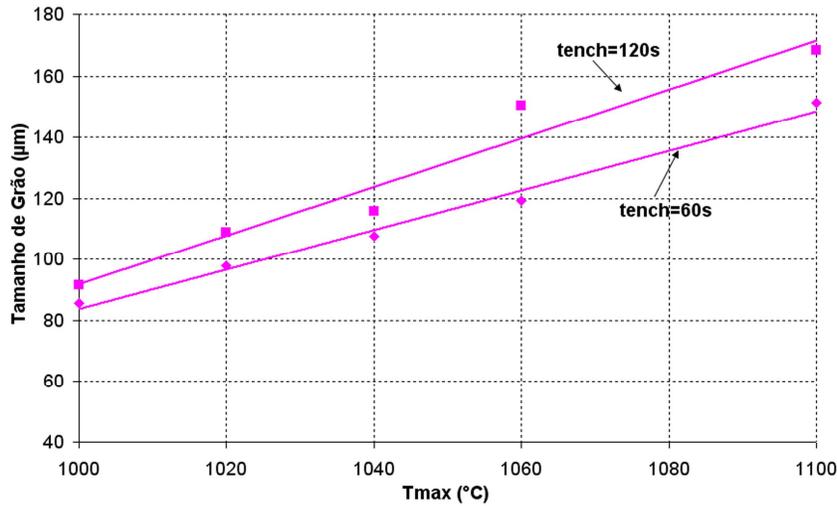


Figura 6: Comparação do diâmetro dos grãos entre as amostras ensaiadas durante encharques de 120 e 60 s (M32, 0,35 mm espessura, TA=25°C/s, TR=12°C/s, Tmax= 1.000°C, 1.020°C, 1.040°C, 1.060°C e 1.100°C).

4 CONCLUSÕES

De posse dos resultados obtidos e da análise dos parâmetros de recozimento ultra-rápido, realizados por simulação em chapas de aço elétrico de grão não-orientado totalmente processado, as seguintes conclusões podem ser apontadas:

- as simulações foram realizadas com sucesso. A geometria e as dimensões propostas para os corpos-de-prova obtiveram êxito, não acarretando deformação ou empenando as chapas, fatos estes que comprometeriam suas perdas magnéticas;
- os ciclos térmicos propostos foram satisfatoriamente reproduzidos pelo simulador Gleeble, não apresentando variações significativas de temperatura, durante os ensaios, que pudessem interferir nos resultados encontrados;

- as chapas apresentaram microestrutura ferrítica com grãos totalmente recristalizados de tamanho heterogêneo.
- a temperatura de encharque exerceu grande influência no tamanho de grão dos aços utilizados, com grãos crescendo severamente com o aumento da temperatura; e
- as perdas magnéticas apresentaram comportamento semelhante em relação ao parâmetro temperatura de encharque para ambos tempos de encharque, com a presença de um valor mínimo de P15 para temperaturas em torno de 1.040 °C.

Agradecimentos

Ao Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF / UFRGS), pela oportunidade e infra-estrutura para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 LANDGRAF, F. J. G. Propriedades Magnéticas de Aços para Fins Elétricos. **Nobre Consultoria**, 2001. Disponível em <<http://www.nobreconsultoria.com.br/artigos/Acos%20Eletricos.pdf>>. Acesso em 23 abril 2008.
- 2 METALS HANDBOOK: PROPERTIES AND SELECTION: NONFERROUS ALLOYS AND SPECIAL-PURPOSE MATERIALS, **ASM INTERNATIONAL**, Vol 2, pag. 2304-2327, 1990.
- 3 SCHOEN, W., Jerry. Ultra-Rapid Annealing of Nonoriented Electrical Steel, **U. S. Patent 4898627**, 1990.
- 4 ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM188–(05/1999) Materiais metálicos - Dureza Vickers - Parte 1: Medição de Dureza Vickers**
- 5 DIN EN 60404-2: **Magnetic materials - Part 2: Methods of measurement of the magnetic properties of electrical steel sheet and strip by means of an Epstein frame** (IEC 60404-2:1996); German version EN 60404-2:1998.
- 6 BATISTELA, N. J.; LUZ, M. V. F.; SADOWSKI, N.; CARLSON, R.; BASTOS, J. P. A; PENG, P. K.; OLIVEIRA, A. M. de. **Uma metodologia de caracterização magnética de aço silício e aplicações na predição das perdas magnéticas sob regimes de indução senoidal e distorcido**. In: Congresso Regional de Ensayos No Destructivos y Estructurales - 3 a 5 de Outubro, 2000, Mar Del Plata. Anais de Congresso, 2000. p. 283-288.
- 7 ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR13284 - Preparação de Corpos-de-Prova para Análise Metalográfica**, 1995.
- 8 ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8108: Ataque com reativos metalográficos em ligas ferrosas**, 1983.
- 9 ASTM, American Society for Testing and Materials. **ASTM E112-96: Standard Test Methods for Determining Average Grain Size**, 1996.
- 10 SHIMANAKA, H.; ITO, Y.; MATSUMURA, K.; FUKUDA, B. Recent development on non-oriented electrical steel sheets. **Journal of Magnetic Materials**, 1982, v. 26, p. 57-64.