

ESTUDO DO EFEITO DA RECUPERAÇÃO E RECRISTALIZAÇÃO NAS PERDAS MAGNÉTICAS EM AÇOS ELÉTRICOS¹

*Thomas Seiji Pascoto Nishikawa²
Daniel Rodrigues Junior³
Fernando José Gomes Landgraf⁴*

Resumo

Este trabalho compreende um estudo da variação das propriedades magnéticas de aços elétricos devido ao efeito da recuperação e recristalização para tempos e temperaturas de recozimento diversas.

Palavras-chaves: Recuperação; Recristalização; Aços elétricos.

Abstract

This paper studies the change in magnetic properties in electric steels due to recovery and recrystallization taking place for different annealing times and temperatures.

Key words: Recovery; Recrystallization; Electric steel.

¹ *Contribuição técnica ao 67º Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

² *Graduando, Depto. de Eng. Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica (Poli), Universidade São Paulo (USP), SP, Brasil.*

³ *Mestre em Eng. de Materiais, Depto. de Eng. Metalúrgica e de Materiais, Poli, USP, SP, Brasil.*

⁴ *Professor Doutor, Depto. de Eng. Metalúrgica e de Materiais, Poli, USP, SP, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Na fabricação de aços elétricos evita-se que haja concentrações elevadas de carbono, pois esse elemento é responsável pelo aumento das perdas como mostrado por Bueno e Marra [1]. Para isso as bobinas de aço elétrico geralmente passam por tratamento térmico de descarbonetação. No entanto, quando pensamos em aplicações para aços percebemos que conforme reduzimos o teor de carbono existe uma redução das propriedades mecânicas e o aço tende a ficar mais maleável. Esse fato resulta na limitação de usos possíveis para os aços elétricos, e quando pensamos, por exemplo, em motores elétricos é possível ver essa limitação. Pode-se prover melhora das propriedades mecânicas fornecendo-se pequena quantidade de deformação plástica. No entanto, mesmo pequenas deformações (inferiores a 10%) causam considerável deterioração das propriedades magnéticas apresentadas pelo material [2]. Motivados pela necessidade de produção de aços com boas propriedades mecânicas e magnéticas, estudos foram conduzidos para avaliar o efeito do tratamento térmico de recuperação sobre essas características. O fenômeno da recuperação consiste da diminuição da energia acumulada resultante da deformação do material, esse evento ocorre com recozimento em temperaturas acima de 300°C para aços em geral. Essa diminuição de energia se dá em razão da reorganização e aniquilação de discordâncias contidas no material.

Tradicionalmente, a recuperação é estudada visando entender seu efeito nas propriedades mecânicas. Por esse motivo a fração recuperada geralmente é calculada em função da variação do limite de escoamento do material [1]. No entanto, Martinez-de-Guerenu [3] propõe calcular a fração recuperada pela variação do valor do campo coercivo em aços elétricos. Dessa forma, o presente trabalho visa a produção de novos dados que permitam a avaliação da evolução das magnéticas após tratamento térmico de recuperação.

2 MATERIAIS E METODOS

2.1 Material Utilizado

O material de partida para a realização desse trabalho foi extraído de uma única bobina de aço elétrico de grão não orientado, gentilmente cedido pela Brasmetal Waelzholz. A composição química do material é dada pela Tabela 1. O material como recebido continha deformação real de 5% (*skin pass*) fornecida através de laminação a frio, densidade 7.781 kg/m³ e espessura de 583 μm.

Tabela 1. Composição química do material sob estudo

C	Mn	P	S	Si	Al	Cu	Cr	Ni
0,0028	0,51	0,034	0,0048	0,773	0,255	0,007	0,021	0,003

A bobina foi cortada com o uso de guilhotina para a extração dos corpos de prova. Foram produzidas chapas em forma de tiras com dimensões 30x3 cm com o comprimento paralelo à direção de laminação das chapas. Após o corte as amostras foram encaminhadas para o recozimento. Essa etapa tem como objetivo a produção de amostras com diferentes tempos e temperaturas de recozimento.

Dessa forma o tratamento térmico foi executado de acordo com os parâmetros descritos na Tabela 2. Para cada par temperatura/tempo foram usadas duas

amostras para que uma delas possa ser usada na caracterização das propriedades mecânicas cujo ensaio tem caráter destrutivo.

Tabela 2. Parâmetros do tratamento térmico de recuperação

Temperatura (°C)	Tempo (min.)			
550	15	30	45	60
600	15	30	45	60
650	15	30	45	60
700	15	30	45	

A caracterização magnética ocorreu por meio de um ensaio para a determinação da perda total em lâmina solteira. Usou-se o equipamento SOKEN (localizado no Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT) e a magnetização se deu paralela à direção de magnetização e com frequência de excitação 60 Hz. Para avaliar a homogeneidade dessa propriedade ao longo do corpo de prova, foram tomadas quatro medidas em regiões distintas para cada corpo de prova.

Finalmente foi observada a microestrutura das amostras para determinar se houve recristalização. Para isso partes da chapa foram cortadas e embutidas em baquelite, em seguida o material foi lixado com lixas d’água de 600, 1200, em seguida o material foi polido com pasta de diamante de 6, 3 e 1 μ m, após o polimento as amostras foram atacadas com nital 4% de modo a que se revelassem contornos de grão na matriz ferrítica.

3 RESULTADOS

Pelas medidas obtidas pelo equipamento Soken obtivemos os seguintes valores de perdas totais para as chapas para as induções de 1T e 1,5T.

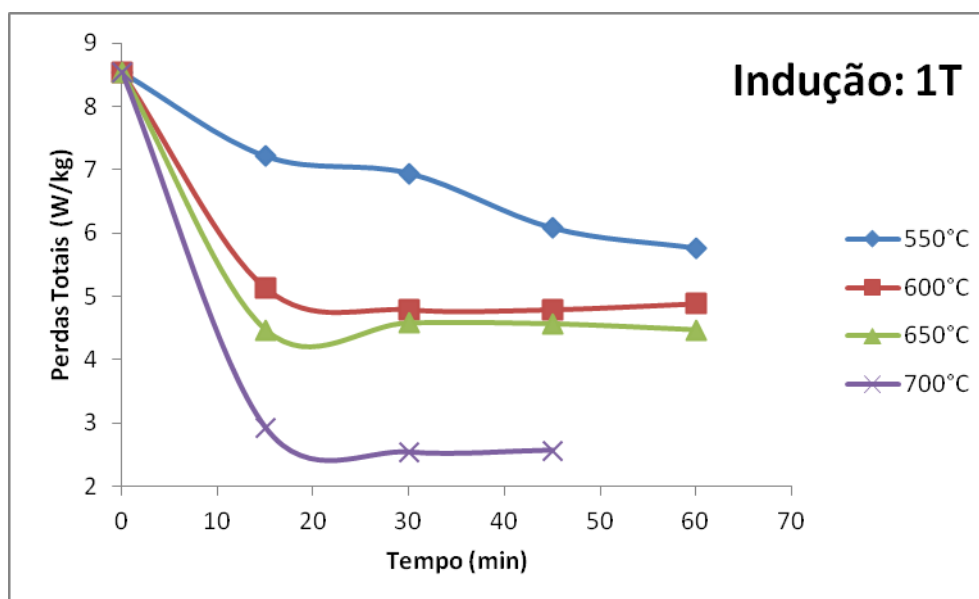


Figura 1. Gráfico dos valores de perdas totais medidos pelo tempo de recozimento para diversas temperaturas para indução de 1 tesla.

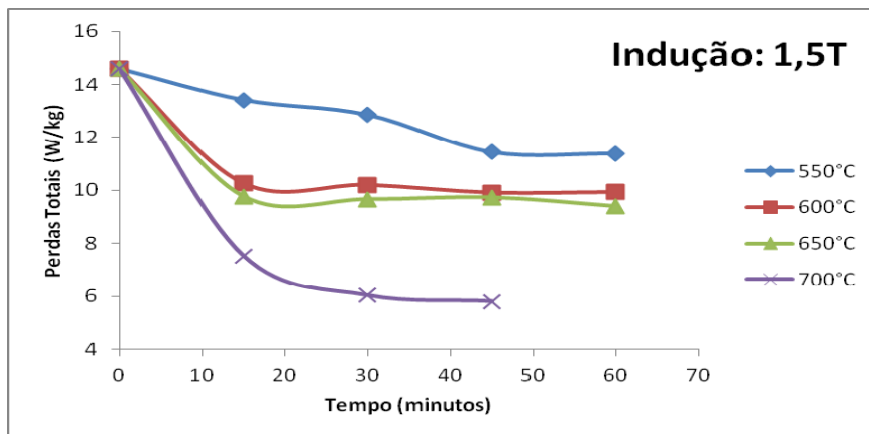


Figura 2. Gráfico dos valores de perdas totais medidos pelo tempo de recozimento para diversas temperaturas para indução de 1,5 tesla.

Tradicionalmente a recuperação é medida como tendo base a variação de alguma propriedade mensurável do material a ser estudado, com isso

No entanto Martinez-de-Guerenu [3] propõe calcular a fração recuperada pela variação do valor do campo coercivo em aços elétricos sabendo que o mesmo será proporcional a variação do limite de escoamento do material visto que a densidade de discordâncias será a mesma para ambos. Com essa relação ela chega a seguinte fórmula.

$$1 - R = \frac{H_c}{H_c^{def}}$$

Para a qual R é a fração recuperada, H_c é o campo coercivo para o material deformado recozido a uma temperatura e tempo específico, e H_c^{def} é o campo coercivo do material deformado sem nenhum recozimento.

Utilizando o conceito análogo foi desenvolvido a fórmula abaixo para contabilizar a porcentagem recuperada do material da propriedade medida, tal como Guerenu [3], só que para perdas totais e não campo coercivo como mostrada abaixo.

$$1 - R = \frac{P}{P_0}$$

Onde P é a perda total medida para um determinado tempo e temperatura e P_0 é a perda total medida do material deformado sem recozimento e R é a fração recuperada, com essa equação chegamos nos seguintes dados.

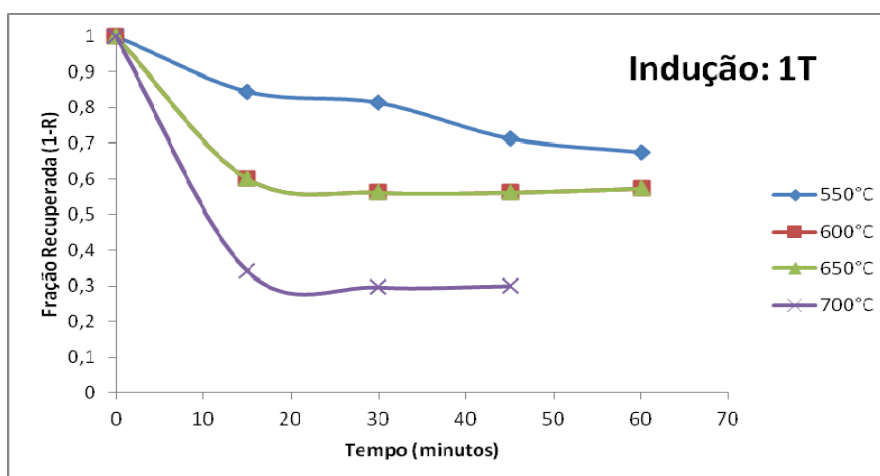


Figura 3. Gráfico dos valores de fração recuperada pelo tempo para diversas temperaturas para indução de 1 tesla.

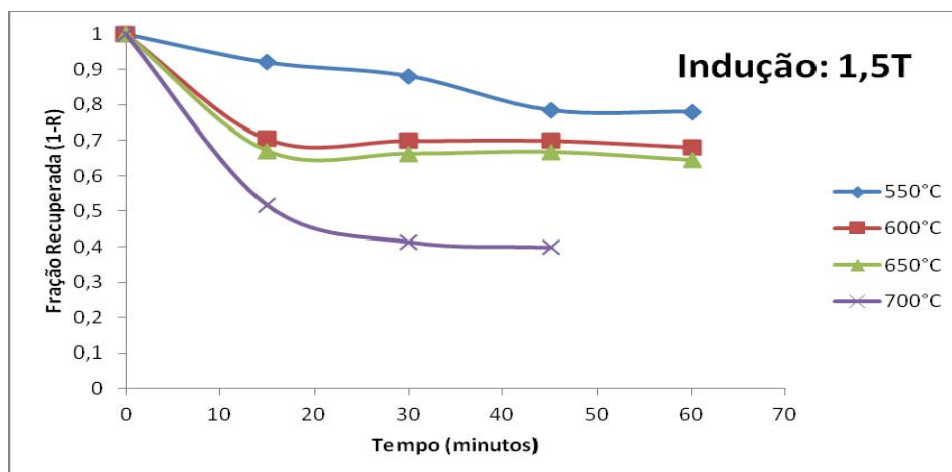


Figura 4. Gráfico dos valores de fração recuperada pelo tempo para diversas temperaturas para indução de 1,5 tesla.

Além das medidas magnéticas foi realizada metalografia das diversas amostras para verificar se houve variação na estrutura do material e se houve início de recristalização nas amostras que passaram por tempos e temperaturas mais elevadas, a metalografia revelou que para as amostras de 700°C foi observado início de recristalização e até houve uma parcela significativa de material recristalizado, como mostrado pelas figuras abaixo, que comparam a microestrutura do material recozido a 650°C durante uma hora e o material recozido a 700°C durante quinze minutos.

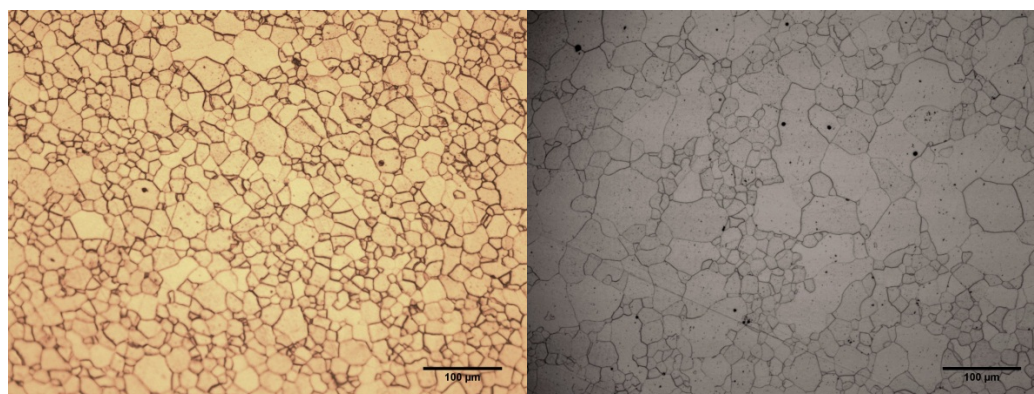


Figura 5. Comparação da microestrutura do material recozido a 650°C durante uma hora (esquerda) e do material recozido a 700°C durante 15 minutos (direita).

Mesmo havendo recristalização foi utilizado o mesmo parâmetro de recuperação para estudar o comportamento das propriedades e para que seja possível comparar com os dados obtidos pela recuperação.

4 DISCUSSÃO

Observando a curva de recuperação conseguimos extrair que conforme elevamos a temperatura de recozimento o valor da parcela recuperada tende a aumentar esse evento também foram enunciados pelos experimentos de Michalak e Paxton [4] em 1966 com recuperação em aços "zone melted" que revelaram um perfil interessante e condizente com o observado das curvas de recuperação com o tempo para temperaturas diversas.

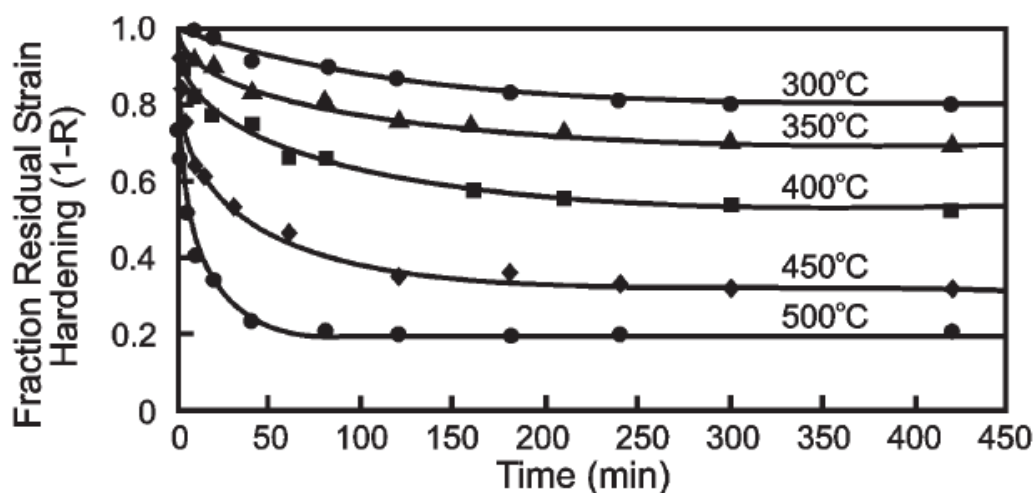


Figura 6. Gráfico dos valores obtidos para fração recuperada por Michalak e Paxton [4].

Além disso, temos que para as amostras tratadas a 650°C, mesmo tendo ficado a uma hora recozendo, não apresentou sinais de recristalização, enquanto as amostras que ficaram a 700°C logo apresentaram sinais de recristalização como mostrado pela micrografia.

Nota-se também que o valor da fração recuperada diminui com o aumento da indução magnética do material, onde, por exemplo, as amostras tratadas a 600°C e a 650°C apresentaram valor de fração recuperada estagnada em 0,6 para indução de um tesla enquanto para indução de 1,5 tesla apresentaram valores próximos a 0,7 de fração recuperada, esse comportamento se mostrou presente para todas as amostras, incluindo as amostras tratadas a 700°C que apresentaram recristalização.

5 CONCLUSÃO

A partir dos dados observados podemos inferir que na recuperação existe um valor de temperatura próximo aos 650°C para o qual o valor de fração recuperada apresenta o seu máximo e, além disso, o máximo tende a se estagnar a tempos abaixo de 15 minutos. Também podemos concluir que a recristalização mesmo sendo parcial diminui consideravelmente as perdas medidas, o que é condizente com a teoria [5]. Finalmente podemos concluir que para induções magnéticas mais altas o efeito da recuperação tende a diminuir, visto que para o mesmo material recozido a mesma temperatura e tempo há uma considerável diferença entre o valor da fração recuperada para as induções de 1 tesla e 1,5 tesla.

Agradecimentos

Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT; e Brasmetal Waelzoltz S.A.

REFERENCIAS

- 1 Marra, Kleiner M, e Vicente T Buono. "VARIAÇÃO DAS PERDAS MAGNÉTICAS DURANTE ENVELHECIMENTO." *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*, 2006: 36-39.
- 2 F.J.G. Landgraf, M. Emura "Loss and permeability improvement by stress relieving fully processed electrical steels with previous small deformations" *J. Magn. Magn. Mater.* vol. 242, pp. 152-156, 2002.

- 3 A. Martinez-de-Guerenu, F. Arizti, I. Gutierrez. "Recovery during annealing in a cold rolled low carbon steel.Part II: Modelling the kinetics" 2004 Acta Materialia
- 4 J. T. Michalak, H. W. Paxton, "Some Recovery Characteristics of Zone Melted Iron" AIME Metallurgical Transactions 221,1961
- 5 T. Yonamine, M.L. Henrique, R. Takanohashi "Anisotropia das Propriedades Magneticas de Aços Semi-Processados"- 57^o Congresso Anual da ABM Internacional, 2002