

O EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO DE RECUPERAÇÃO SOBRE AS PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DE AÇOS ELÉTRICOS DE GRÃO NÃO ORIENTADO¹

*Daniel Luiz Rodrigues-Júnior²
Thomas Seiji Pascoto Nishikawa³
Adriano Alex Almeida³
Fernando José Gomes Landgraf⁴
André Sereno Lopes⁵
Marcelo Ferreira Lucas⁶*

Resumo

Este trabalho avalia o efeito do tratamento térmico de recuperação sobre as propriedades magnéticas em aços elétricos de grão não orientado. Chapas laminadas a frio foram submetidas a tratamento térmico em diferentes tempos e temperaturas. As transformações microestruturais provocadas pela ação do recozimento foram observadas através de micrografias e pela evolução das propriedades magnéticas analisadas através do procedimento de separação de perdas em parcelas.

Palavras-chave: Aço elétrico; Deformação plástica; Recuperação; Perdas magnéticas.

THE EFFECT OF RECOVERY HEAT TREATMENT ON THE MAGNETIC PROPERTIES OF NON ORIENTED ELECTRICAL STEELS

Abstract

The present paper evaluates the effect of recovery annealing on the magnetic properties of non oriented electrical steels. Previously cold rolled strips, with 5% thickness reduction, were submitted to heat treatment at different times and temperatures. The microstructural transformations caused by annealing was observed by means of micrographs and magnetic properties evolution.

Key words: Electrical steel; Plastic strain; Recovery; Magnetic losses.

¹ *Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Doutorado. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica, Universidade São Paulo (USP), São Paulo, SP, Brasil.*

³ *Engenharia de Materiais. Mestrando. Departamento de Engenharia de Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica, USP, São Paulo, SP, Brasil.*

⁴ *Engenharia de Materiais. Dr. Professor, Depto. de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica, USP; e Diretor Presidente do Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, SP, Brasil.*

⁵ *Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Desenvolvimento de Qualidade e Produto, Brasmatal Waelzholz, Diadema, SP, Brasil.*

⁶ *Engenharia Metalúrgica. Supervisor de SGI e Melhoria Contínua, Brasmatal Waelzholz, Diadema, SP, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Aços elétricos de grão não orientado (ou GNO, como são conhecidos) constituem a principal matéria prima para a construção de motores elétricos. Seu desempenho pode ser avaliado em termos da perda magnética, energia que este material dissipa quando submetido a um campo magnético cuja intensidade varia ciclicamente. Essa característica é afetada por aspectos microestruturais e parâmetros operacionais, como a frequência de excitação, por exemplo.

Em trabalho anterior foi avaliado o efeito da deformação plástica sobre as propriedades magnéticas em aços elétricos laminados a frio.⁽¹⁾ Os resultados ali apresentados indicam o já bem conhecido efeito deletério da deformação, também observado por Landgraf e Emura.⁽²⁾ No entanto, o artigo reporta que o aumento da energia dissipada se deve apenas ao incremento de sua parcela histerética. A parcela de excesso reduziu-se a valores desprezíveis tornando o desempenho do material menos sensível à frequência de excitação.

Visando atingir um bom desempenho de propriedades mecânicas e magnéticas, o tratamento térmico de recuperação foi proposto.⁽³⁾ É objetivo deste trabalho é avaliar como o tratamento de recuperação atua sobre as diferentes parcelas da perda magnética em amostras previamente deformadas. Assim, é feita uma avaliação do desempenho em função da frequência de excitação e este dado é relacionado com possíveis alterações microestruturais ocasionadas pelo tratamento térmico de recuperação. Dessa forma, avalia-se se este tratamento pode proporcionar redução da energia dissipada por histerese sem tornar o desempenho do material sob estudo mais sensível à frequência de excitação.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O material de partida foi extraído de uma única bobina de aço elétrico de grão não orientado em estado recozido. São características desse material resistividade 67,7 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$, densidade 7781 kg/m^3 , espessura inicial 0,620 mm e composição química descrita na Tabela 1.

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 deformação plástica foi fornecida por meio de laminação a frio. Dessa forma aplicou-se deformação real obtendo-se espessura final de 0,602 mm. A chapa laminada foi cortada em lâminas com dimensões 30 x 3 cm e o comprimento mantido paralelo à direção de laminação. Essas lâminas foram agrupadas de forma a produzirem cinco conjuntos de amostras, cada um contendo 45 lâminas.

Os conjuntos de amostras foram encaminhados para recozimento em atmosfera inerte de N_2 . Os parâmetros do tratamento térmico estão descritos na Tabela 2. Portanto, para cada par tempo/temperatura usou-se 15 lâminas. O quinto conjunto foi mantido em seu estado posterior à laminação, ou seja, não passou por recozimento.

Tabela 2. Parâmetros do tratamento térmico

Conjuntos	Temperatura (°C)	Tempo (min)		
		30	60	90
1	300	30	60	90
2	400	30	60	90
3	500	30	60	90
4	700	30	60	--

Informações referentes à microestrutura das amostras foram obtidas por meio de micrografias extraídas a partir de microscopia óptica. Para isso lâminas foram cortadas gerando corpos de prova que foram submetidos a procedimento de preparação metalográfica e a superfície sobre observação (determinada pela secção longitudinal do corpo de prova) foi atacada com uso de Nital 3%.

A caracterização magnética fez uso de um quadro de Epstein. Através desse equipamento foram obtidas as curvas de histerese magnética. Foram conduzidos ensaios em regime quase estático (frequência de excitação de 5 mHz) para indução máxima de 1,0 T. Dessa forma, pode-se medir diretamente a energia dissipada por histerese que é determinada pela área interna dos ciclos obtidos nessa etapa de caracterização.

A indução máxima de 1,0 T foi mantida para a realização dos ensaios em frequência. Nessa etapa os ciclos de histerese foram obtidos para valores de frequência variando entre 25 e 200 Hz. A energia total dissipada ao longo de cada ensaio foi novamente determinada pela medição da área dos ciclos de histerese.

Para uma avaliação mais aprofundada da acerca das propriedades magnéticas foi aplicado o processo de separação da energia dissipada em parcelas. O valor da energia dissipada em razão de correntes parasitas (W_c) foi determinado a partir da Equação 1.

$$W_c = \frac{(\pi \times B_{\max} \times e)^2 \times f}{6 \times \rho} \quad (1)$$

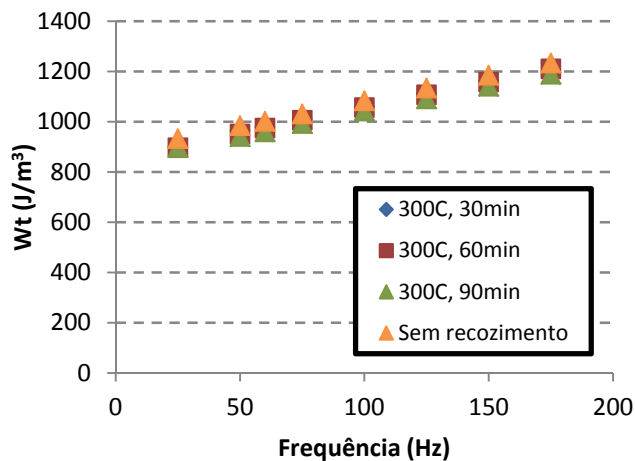
Onde f é a frequência, e a espessura, ρ a resistividade e B_{\max} é a indução máxima. As perdas de excesso correspondem à diferença entre a energia total e a soma das parcelas parasita e histerética. Dessa maneira, o total da energia dissipada (W_t) é composto pela soma das parcelas conforme descreve a Equação 2.

$$W_t = W_h + W_{cl} + W_{exc} \quad (2),$$

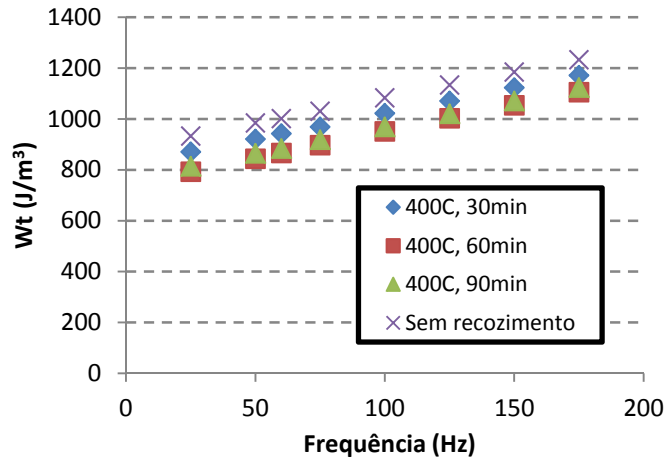
Onde W_h , W_{cl} e W_{exc} são as parcelas histerética, parasita e de excesso da energia dissipada.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

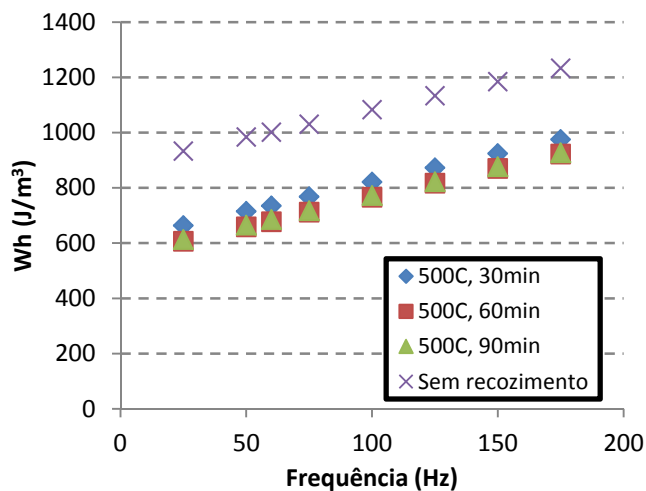
Os gráficos da Figura 1 trazem os resultados da caracterização magnética para ensaios realizados em frequência. Nesta figura é mostrada a energia dissipada (W_t) em função da frequência de excitação. Os dados são apresentados de forma a promover uma comparação entre os valores obtidos para o material sem recozimento e as amostras tratadas a 300 (a), 400 (b), 500 (c) e 700°C (d). Nota-se que o tratamento térmico realizado a 300°C tem efeito desprezível sobre o total da energia dissipada em todos os ensaios realizados. Nos outros ensaios ocorreu queda da energia dissipada mesmo após um período de apenas 30 minutos. Essa melhora de desempenho é mais intensa quanto maior a temperatura de recozimento.



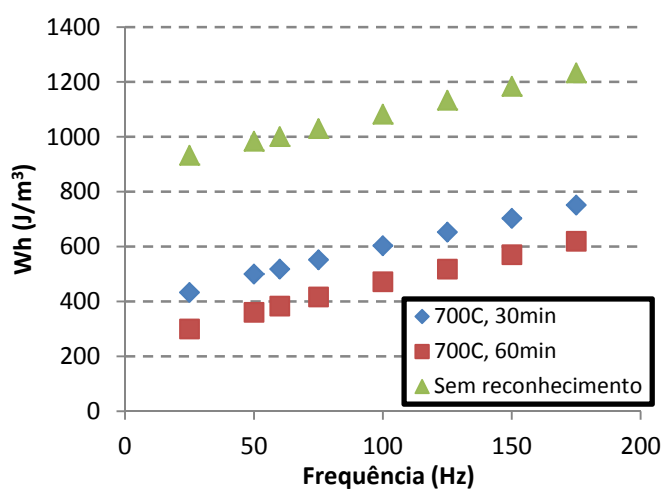
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 1. Energia dissipada total (Wt) em função da frequência para aços laminados a frio, submetidos a diferentes tratamentos térmicos.

A Figura 2 traz os resultados dos ensaios de caracterização magnética executados em regime quase estático. Novamente, o tratamento a 300°C pouco atua sobre as propriedades magnéticas. Dessa forma, fica indicado que transformações microestruturais ocorrem apenas a partir de 400°C, tomando-se em conta o período de tempo analisado. Tal efeito se deu através da redução da energia dissipada por histerese. Este resultado indica que a melhora de desempenho do material pode está relacionada a essa parcela da energia dissipada. A diminuição da quantidade de defeitos cristalinos, bem como redução da energia residual, ocasionada pelo recozimento explica a melhora do desempenho energético do material.⁽⁴⁾

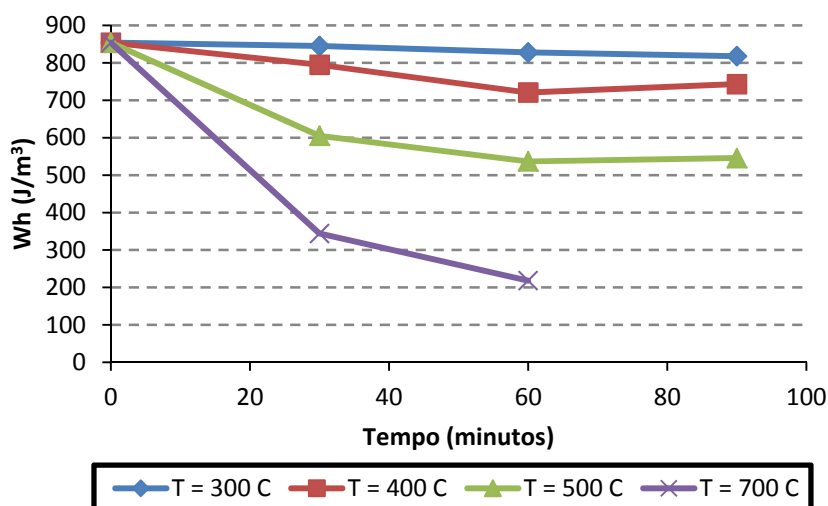


Figura 2. Evolução da energia dissipada por histerese (indução máxima de 1,0 T) para diferentes temperaturas em função do tempo de tratamento térmico de recuperação das propriedades magnéticas.

Como dito anteriormente, a energia dissipada pelas correntes parasitas pode ser calculada através da Equação 1. Tendo em vista que não houve alteração da espessura do material e que a densidade é fruto da composição química, em todas as amostras analisadas, a energia relacionada a correntes parasitas cresce linearmente com a frequência de excitação. Esse dado, bem como os resultados do procedimento de separação da energia total em parcelas, está descrito na Figura 3 para o material sem recozimento.

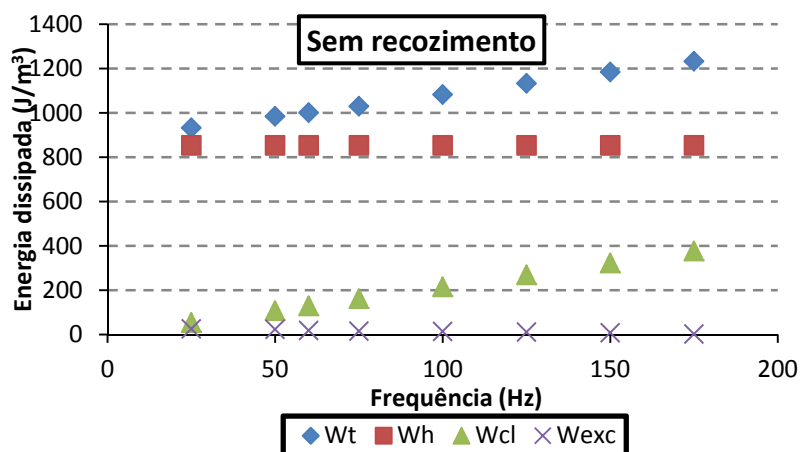


Figura 3. Comportamento das parcelas da energia dissipada em função da frequência de excitação para amostra laminada a frio não submetida a recozimento posterior.

Os resultados da Figura 3 repetem o que foi observado em trabalho anterior,⁽¹⁾ ou seja, energia de excesso com valores desprezíveis em amostras de aço GNO laminado a frio. Tal fato foi justificado pelos autores como consequência de um processo de fragmentação dos grãos. Essa característica é típica em estruturas de deformação em materiais de policristalinos de estrutura CCC ou CFC de alta energia de empilhamento.⁽⁵⁾ Tal fenômeno tem origem na necessidade de rotação de diferentes regiões de um grão para que este possa acomodar a deformação plástica sofrida pelos grãos da vizinhança.⁽⁶⁾ Assim, atribuiu-se à ação da deformação

plástica sobre a energia de excesso, efeito análogo ao apresentado pela diminuição do tamanho de grão. Portanto, assim como seria proporcionado pela redução do tamanho de grão, a fragmentação pode ter provocado a redução da distância entre paredes de domínios diminuindo a dissipação por excesso.⁽⁷⁾

As amostras recozidas em temperaturas de até 500°C repetiram esse mesmo comportamento. Isso fica ilustrado nas Figuras 4 e 5, onde dissipação de excesso também é praticamente nula. Esse resultado indica que o tratamento térmico não foi capaz de promover alterações microestruturais que substituíssem a estrutura de grãos fragmentados.

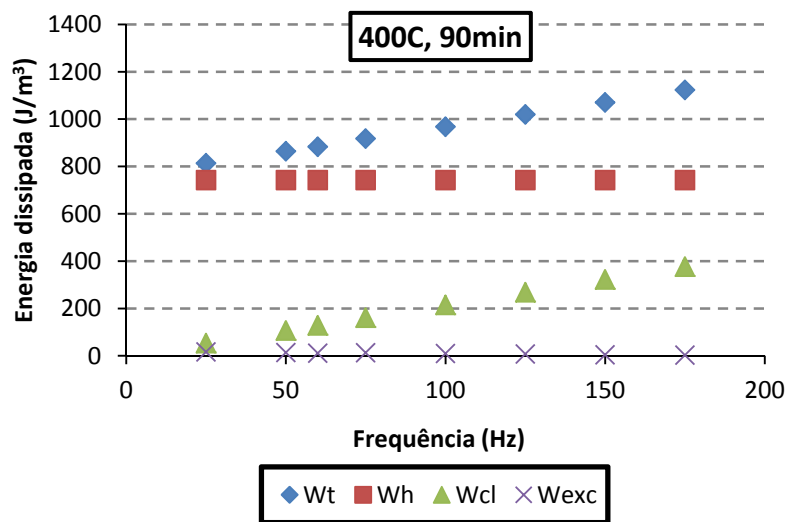


Figura 4. Comportamento das parcelas da energia dissipada em função da frequência de excitação para amostra laminada a frio não submetida a tratamento térmico a 400 °C durante 90 minutos.

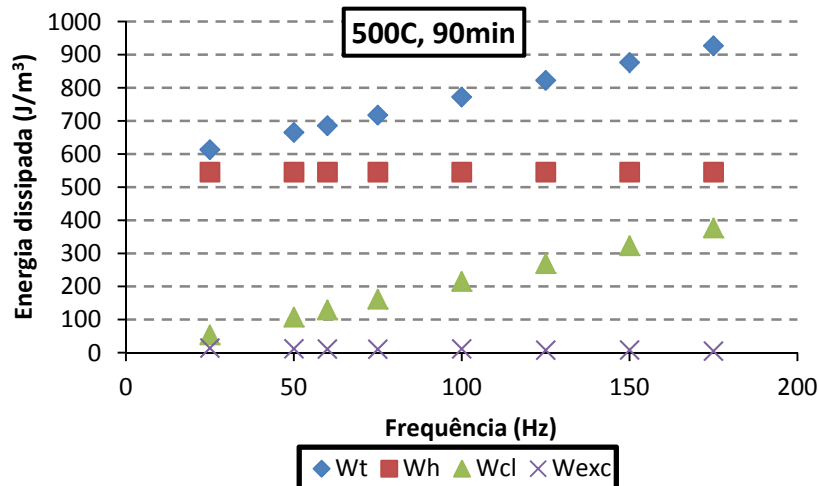


Figura 5. Comportamento das parcelas da energia dissipada em função da frequência de excitação para amostra laminada a frio não submetida a tratamento térmico a 500°C durante 90 minutos.

Algum aumento na energia de excesso é visto no material recozido a 700°C. Isto está representado nas Figuras 6 e 7.

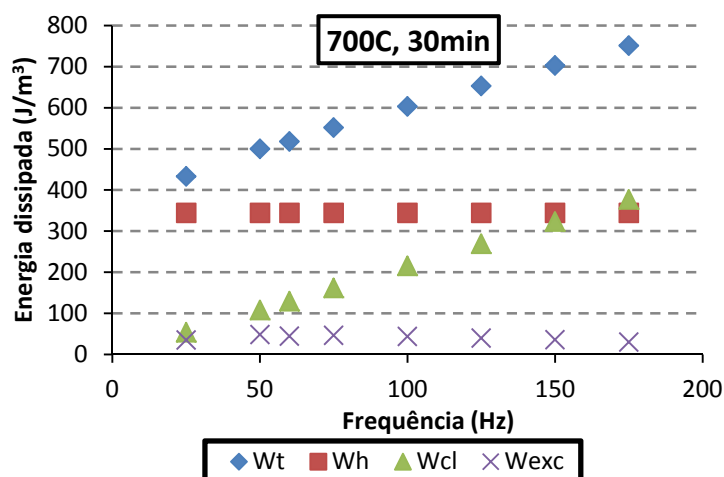


Figura 6. Comportamento das parcelas da energia dissipada em função da frequência de excitação para amostra laminada a frio não submetida a tratamento térmico a 700°C durante 30 minutos.

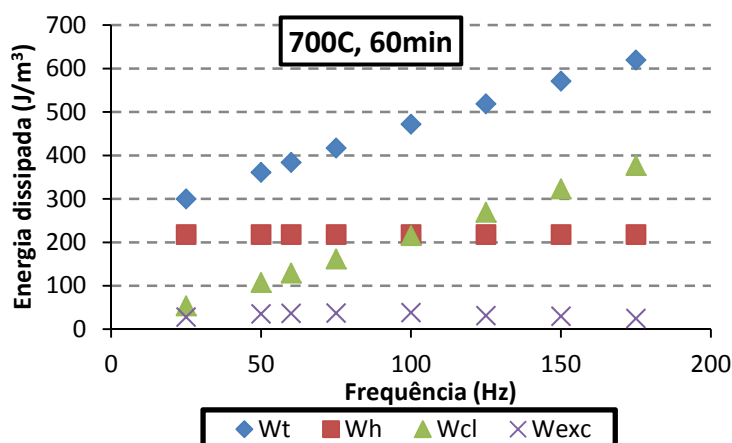


Figura 7. Comportamento das parcelas da energia dissipada em função da frequência de excitação para amostra laminada a frio não submetida a tratamento térmico a 700°C durante 60 minutos.

Os resultados da caracterização magnética indicam ocorrência de mecanismos distintos de transformação microestrutural influenciados pela temperatura de recozimento. Uma comparação entre micrografia da amostra não recozida (Figura 8) e a observada para materiais submetidos a tratamento térmico mostra que para temperaturas de até 500°C as transformações não são observáveis por meio de microscopia óptica (Figura 9). Tal característica denota a ocorrência de recuperação. Esse processo ocorre com o rearranjo e/ou aniquilação de discordâncias. No entanto, a recuperação não é total permanecendo uma estrutura de deformação onde os grãos permanecem fragmentados por contornos geometricamente necessários dando origem a subgrãos.⁽⁸⁾

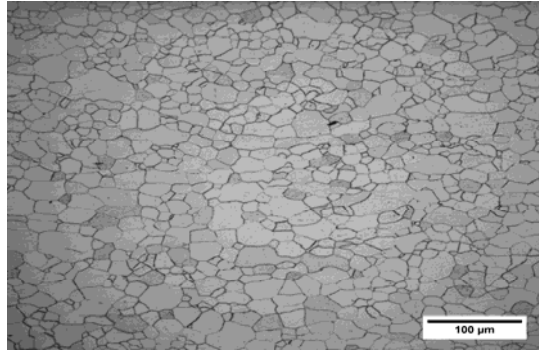


Figura 8. Microestrutura da secção longitudinal amostra deformada a frio não submetida a recozimento.

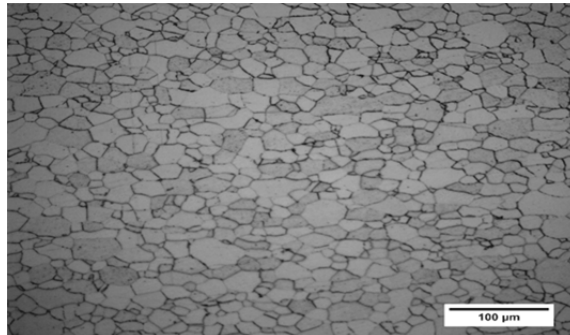


Figura 9. Microestrutura da secção longitudinal da amostra submetida a tratamento térmico de recuperação a 500°C durante 90 minutos.

A análise das micrografias informa que para as amostras recozidas a 700°C ocorreu recristalização. Neste fenômeno ocorre a nucleação de novos grãos, livres de deformação, que (ao longo do recozimento) expandirão através da migração de seus contornos no sentido de consumir os grãos deformados da matriz.⁽⁹⁾ Observa-se através da Figura 10 que a recristalização teve início, porém não se desenvolveu por completo. Em virtude da pequena deformação fornecida, espera-se que os grãos recristalizados tenham maior tamanho que os deformados da matriz. A relação entre tamanho de grão recristalizado e quantidade de deformação plástica é descrita qualitativamente por Burke e Turnbull.⁽¹⁰⁾

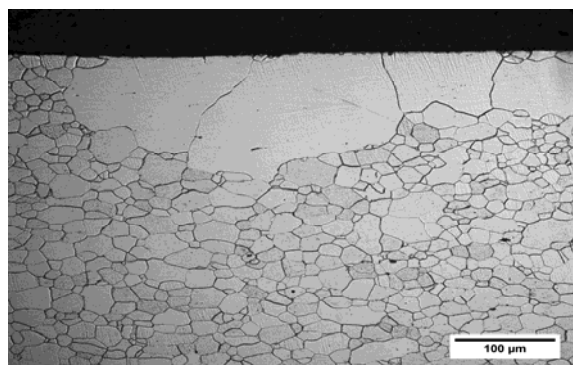


Figura 10. Micrografia da secção longitudinal da amostra recozida a 700°C durante 60 minutos.

O fato de a recristalização ocorrer apenas parcialmente (caminhando da superfície para o centro da chapa) parece ter influenciado o comportamento da energia de excesso. Tal fato pode ser a hipótese por trás do baixo patamar de energia de excesso e sua aparente não relação com a frequência de excitação.

4 CONCLUSÕES

Os dados aqui apresentados informam que o tratamento térmico de recuperação das propriedades magnéticas permite obtenção de aços elétricos GNO com melhor desempenho energético ainda que sejam preservadas algumas características do material em estado deformado. Tal procedimento atua na diminuição da energia dissipada por histerese e mantém a parcela de excesso com valores desprezíveis.

O recozimento realizado a 700°C ocasionou recristalização incompleta. Isso foi observado através da presença de grãos recristalizados próximos à superfície das chapas. Esse fato proporcionou pequeno incremento da energia de excesso, mas sem que se tornasse possível relacionar essa parcela com a frequência de excitação.

Agradecimentos

Agradecemos a Brasmetal Waelzholz que gentilmente nos cedeu o material para esse trabalho e a Francisco Clayton O. Silva, que nos auxiliou durante os tratamentos térmicos.

Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, Ramon Valls Martin e Bruno Ferreira Antunes da Silva.

Daniel Luiz Rodrigues-Jr agradece a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Capes pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- 1 RODRIGUES-JR, D. L. et al. Effect of Plastic Deformation on the Excess Loss of Electrical Steel. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 48, n. 4, p. 1425-1428, 2012.
- 2 LANDGRAF, F. J. G. e EMURA, M. Losses and permeability improvement by stress relieving fully processed electrical steels with previous small deformations. *J. Magnetism and Magnetic Materials*, v. 242-245, n. Part 1, p. 152-156, 2002.
- 3 Instituto de Pesquisas Tecnológicas S/A. LANDGRAF, F. J. G. Processo de tratamento térmico com recuperação magnética na fabricação de aço de grão não orientado, totalmente processado, para uso em máquinas elétricas. n. PI 9802711-5, 2006.
- 4 SABLİK, M. Modeling plastic deformation effects in steel on hysteresis loops with the same maximum flux density. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 40, n. 5, p. 1-8, 2004.
- 5 DELANNAY, L. Observation and modelling of grain interactions and grain subdivision in rolled cubic polycrystal. Tese de doutorado - Departement Metaalkunde en Toegepaste Materiaalkunde. 2001.
- 6 BARRET, C. S. e LEVENSON, L. H. Structure of iron after compression. *AIME*, v. 135, p. 296-326, 1939.
- 7 CAMPOS, M. F. DE;; TEIXEIRA, J. C. e LANDGRAF, F. J. G. The optimum grain size for minimizing energy losses in iron. *J. Magnetism and Magnetic Materials*, v. 301, n. 1, p. 94-99, 2006.
- 8 HUMPHREYS, F.J.; HATHERLY, M. Recrystallization and related annealing phenomena. Oxford: Pergamon, 1996.
- 9 DOHERTY, R. D. et al. Current issues in recrystallization: a review. *Materials Science and Engineering: A*, v. 238, n. 2, p. 219-274, 1997.
- 10 BURKE, J. E.; TURNBULL, D. Recrystallization and grain growth. *Progress in metal physics*, v. 3, p. 220-292, 195AD.