

EFEITO DE PEQUENAS DEFORMAÇÕES E DO RECOZIMENTO EM CHAPAS DE AÇO ELÉTRICO DE GRÃO ORIENTADO¹

*Nicolau Apoena Castro²
Fernando Jose Gomes Landgraf³
Marcos Flávio de Campos⁴*

Resumo

Chapas de aço elétrico de grão orientado foram submetidas a pequenas deformações (deformações reais de 0.002 a 0.2), aplicando-se laminações nas direções <100> e <110>. Observou-se que laminações na direção <100> provocaram o surgimento de grande número de maclas de deformação, além de uma acentuada degradação magnética sob pequenas deformações ($\epsilon < 0.05$), enquanto que laminações na direção <110> levaram a uma menor degradação magnética sob pequenas deformações e pequeno número de maclas. O recozimento das chapas deformadas proporcionou recuperação magnética e recristalização.

Palavras-chave: Aço elétrico de grão orientado; Macla de deformação; Propriedades magnéticas.

EFFECT OF SMALL DEFORMATION AND ANNEALING ON THE MICROSTRUCTURE AND MAGNETIC PROPERTIES OF GRAIN ORIENTED ELECTRICAL STEELS

Abstract

Straining of GO steels in the rolling direction generates mechanical twins and a large increase in the power losses, with the typical steep increase with low deformation. Straining in the transverse direction develops mainly transition bands and the power loss increase is less pronounced. Annealing the strained material lead to recrystallization and magnetic property recovery.

Key words: Electrical steels; Plastic deformation; Recrystallization

¹ *Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ*

² *EPUSP - Departamento de Metalurgia e Materiais, IPT - Laboratório de Metalurgia do Pó e Materiais Magnéticos.*

³ *EPUSP - Departamento de Metalurgia e Materiais,*

⁴ *INMETRO - Divisão de Metrologia de Materiais*

1 OBJETIVO

Estudar a deformação de aço elétrico de grão orientado nas direções $\langle 100 \rangle$ e $\langle 110 \rangle$, detectar a presença de maclas de deformação e a degradação magnética provocada pela deformação e, finalmente, verificar o efeito do recozimento nas perdas magnéticas e na textura das chapas deformadas.

2 INTRODUÇÃO

Aços elétricos de grão orientado são utilizados na fabricação de transformadores elétricos. A utilização do aço elétrico GO em núcleo de transformadores proporciona perdas magnéticas reduzidas graças à textura favorável que este material apresenta. Também conhecida como componente de Goss, a orientação $\{110\} \langle 100 \rangle$ apresenta propriedades magnéticas excelentes quando o campo magnético está alinhado com o eixo $\langle 100 \rangle$, o que ocorre em transformadores.

O processo de fabricação de alguns transformadores exige que as chapas sejam enroladas com raio de curvatura menor que 30 mm, provocando deterioração das propriedades magnéticas devido à deformação mecânica, que é suficiente para o surgimento de maclas de deformação.⁽¹⁾ A motivação desse trabalho é estudar a deformação mecânica e a recuperação magnética após recozimento de chapas submetidas a laminações de 0.002 a 0.2 de deformação real.

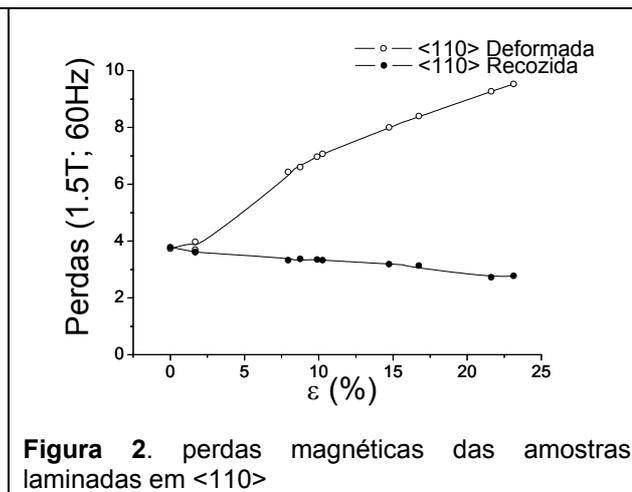
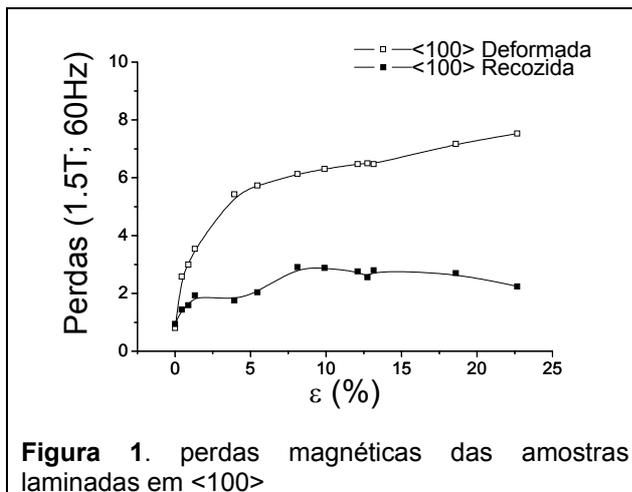
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foram utilizadas chapas de aço elétrico de grão orientado com 3,2% de Si. As amostras foram deformadas laminando-se nas direções $\langle 100 \rangle$ e $\langle 110 \rangle$, que correspondem respectivamente à direção de laminação e à direção transversal, considerando-se a laminação industrial. Foram utilizadas deformações reais de 0.002 a 0.2. Após deformação, as amostras foram recozidas a 800°C por 2 horas.

Foram medidas perdas magnéticas a 1,5T, 60 Hz em analisador de chapas solteiras Soken, modelo DAC-BHW-D2. As amostras foram analisadas em microscópio óptico e microscópio eletrônico de varredura, equipado com EBSD (Philips XL30). As texturas cristalográficas foram analisadas em difratômetro Shimadzu XRD-6000, equipado com goniômetro de textura.

4 RESULTADOS

Os valores das perdas magnéticas a 1,5T, 60 Hz, medidas em analisador de chapas solteiras estão apresentados nas Figuras 1 e 2. A Figura 1 apresenta as perdas do material laminado em $\langle 100 \rangle$ antes e após recozimento, enquanto que a Figura 2 refere-se às chapas laminadas em $\langle 110 \rangle$.



Observou-se que as amostras laminadas em <100> (Figura 1) apresentaram forte elevação das perdas magnéticas após pequenas deformações ($\epsilon < 0.05$). Acima de 5% de deformação, a taxa de crescimento das perdas diminuiu. Esse comportamento já foi observado em chapas de aço elétrico de grão não orientado.^(2,3) Para laminações na direção <110> (Figura 2), o endurecimento magnético sob pequenas deformações foi menor. Fazendo-se uma analogia à equação de Ludwik referente ao endurecimento mecânico, pode-se definir uma equação que descreva o endurecimento magnético:⁽³⁾ $P = P_0 + k \epsilon^n$, onde P é a perda magnética, P_0 é a perda magnética do material livre de deformação, k é uma constante experimental, ϵ é a deformação real e n é o expoente de endurecimento magnético. Ajustando-se os valores medidos ao modelo proposto, encontrou-se $n = 0.34$ para laminação na direção <100> e $n = 0.71$ na direção <110>. Essa diferença pode ser explicada pelo fator de Taylor,⁴⁾ que relaciona orientação cristalográfica e encruamento. Para a orientação $\{110\} \langle 001 \rangle$ o fator de Taylor é 2.1, enquanto que para $\{110\} \langle -110 \rangle$ é 4.⁵⁾

O recozimento proporcionou recuperação parcial das perdas magnéticas. No caso da laminação em <100> houve redução das perdas após recozimento, porém devido a recristalização e conseqüente redução da componente Goss, as amostras recozidas apresentaram perdas superiores a amostra não deformada. Para as amostras laminadas em <110>, houve redução das perdas magnéticas devido à redução da densidade de discordâncias⁽⁶⁾ e à melhoria da textura em relação à orientação $\{110\} \langle 110 \rangle$. Esse comportamento pode ser melhor entendido na apresentação das ODF.

Amostras foram preparadas e atacadas com nital 3%. As imagens estão apresentadas nas Figuras 3 a 9. As direções de referência <100> e <110> estão apresentadas nas Figuras 3 e 4.

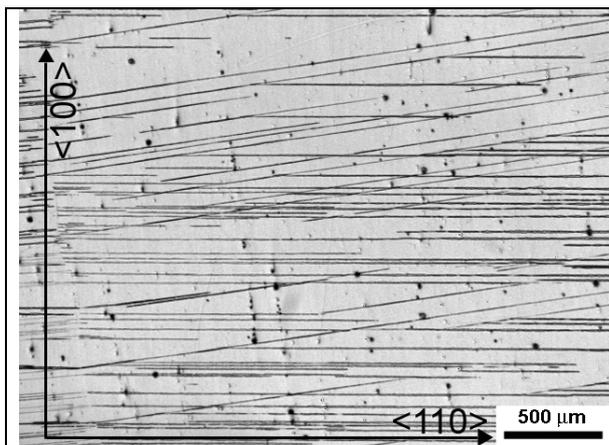


Figura 3. imagem da amostra laminada em <100>. $\epsilon = 0.23$

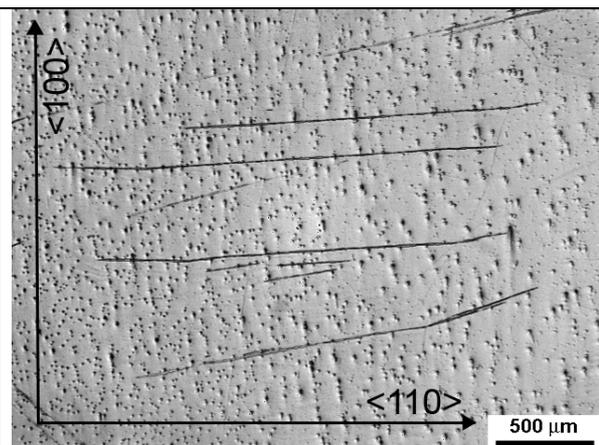


Figura 4. imagem da amostra laminada em <110>. $\epsilon = 0.23$

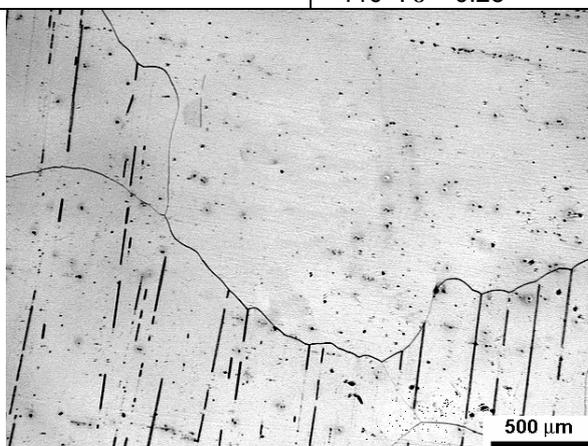


Figura 5. imagem da amostra deformada ($\epsilon = 0.05$) em <100> e recozida a 800°C por 2 horas.

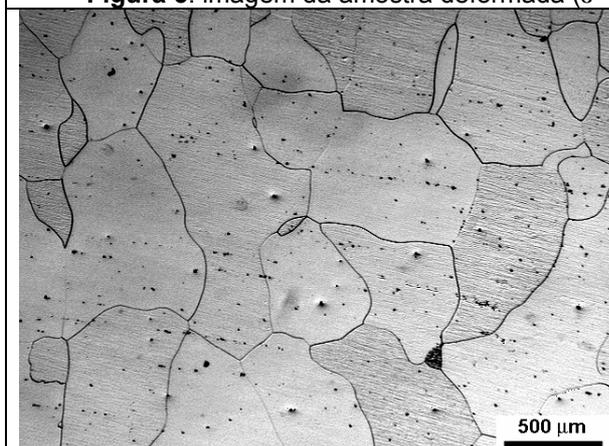


Figura 6. imagem da amostra deformada ($\epsilon=0.08$) em <100> e recozida a 800°C por 2 horas.

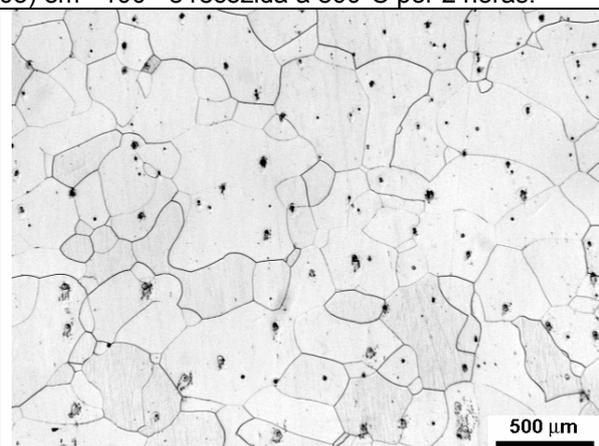


Figura 7. imagem da amostra deformada ($\epsilon=0.08$) em <110> e recozida a 800°C por 2 horas.

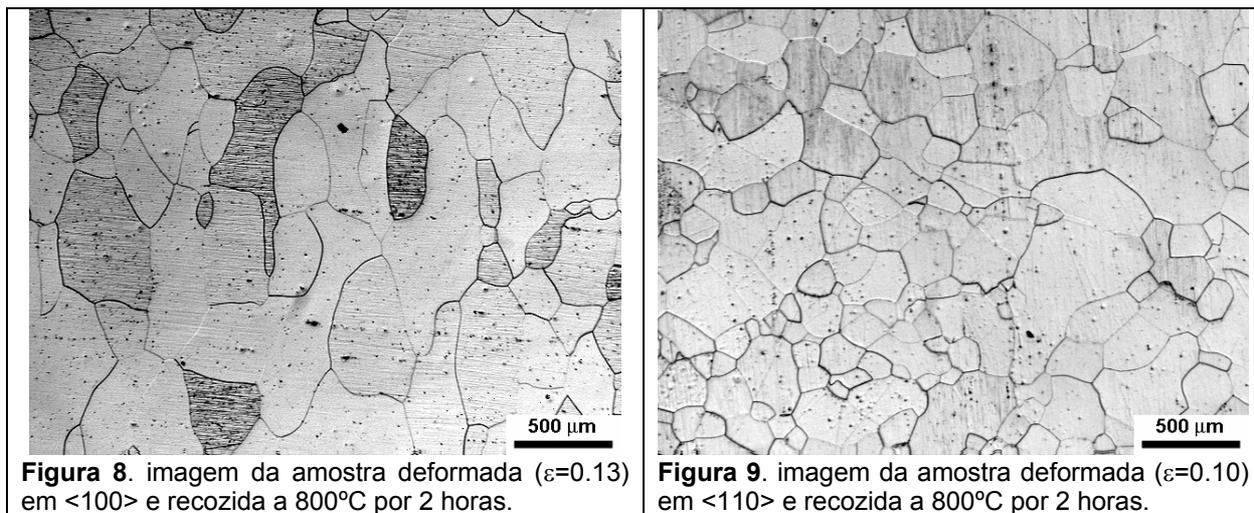


Figura 8. imagem da amostra deformada ($\epsilon=0.13$) em $\langle 100 \rangle$ e recozida a 800°C por 2 horas.

Figura 9. imagem da amostra deformada ($\epsilon=0.10$) em $\langle 110 \rangle$ e recozida a 800°C por 2 horas.

É possível observar que a laminação na direção $\langle 100 \rangle$ (Figura 3) causou a formação de maior número de maclas em relação à laminação na direção $\langle 110 \rangle$ (Figura 4), para o mesmo grau de deformação. O recozimento a 800° C por 2h proporcionou recristalização total das amostras acima de 5% de deformação. Pode-se observar redução do tamanho de grão e desaparecimento das maclas devido à recristalização primária. As amostras laminadas na direção $\langle 110 \rangle$ (Figuras 7 e 9) apresentaram tamanhos de grão inferiores às amostras laminadas em $\langle 100 \rangle$ (Figuras 6 e 8), após o recozimento. Tal fato pode estar relacionado ao fator de Taylor, que é maior para a $\{ 110 \} \langle -110 \rangle$, acumulando maior energia durante a deformação. Observou-se também a recristalização parcial da amostra com 5% de deformação (Figura 5). Provavelmente não houve tempo para terminar a recristalização desse material.

Amostra com deformação real de 0.23, laminada na direção $\langle 100 \rangle$ foi preparada para análise em EBSD. A imagem obtida encontra-se na Figura 10.

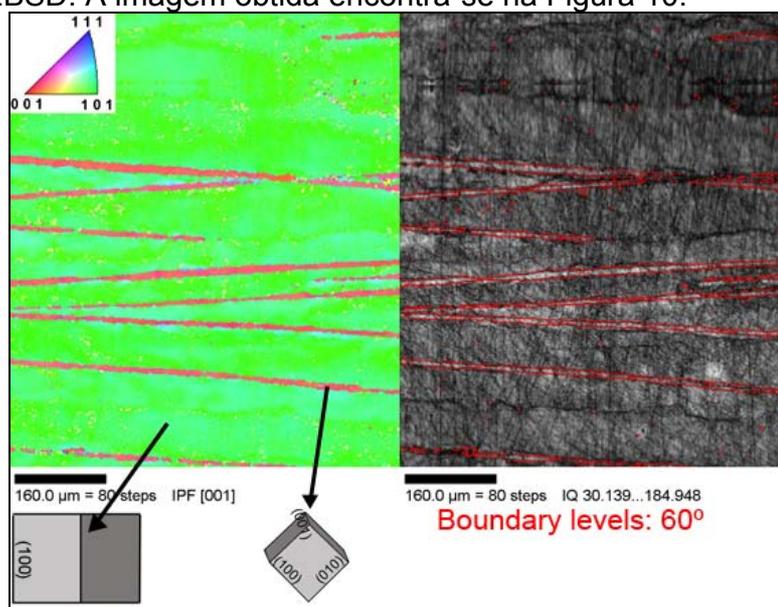


Figura 10. imagem da amostra laminada em $\langle 100 \rangle$ ($\epsilon = 0.23$), obtida por EBSD

Observa-se a presença de maclas de deformação,⁽⁷⁾ em um grão com textura Goss ($\{110\} \langle 001 \rangle$), com diferença de orientação de 60° . As regiões macladas apresentam orientação $(1\ 2\ 9) \ (-3\ -3\ 1)$.

Amostras laminadas nas direções $\langle 100 \rangle$ e $\langle 110 \rangle$ foram analisadas em difratômetro de raios-X equipado com goniômetro de textura. Foram realizadas análises antes e após recozimento. As ODF estão apresentadas nas Figuras 11 a 15, considerando como direção de referência, na ODF, a direção $\langle 100 \rangle$.

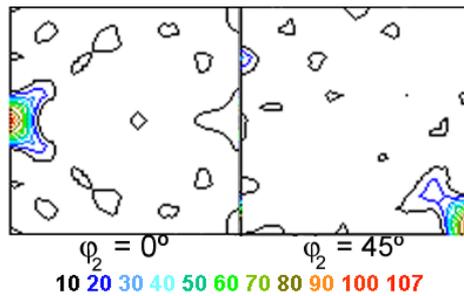


Figura 11. ODF da amostra laminada em $\langle 100 \rangle$, $\varepsilon = 0.23$

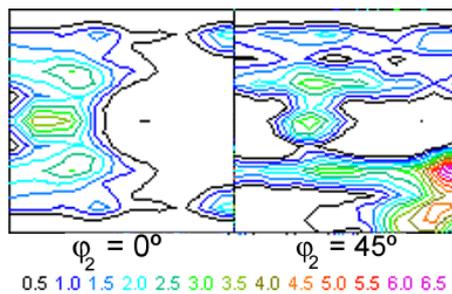


Figura 12. ODF da amostra recozida. ($\varepsilon = 0.23$ em $\langle 100 \rangle$)

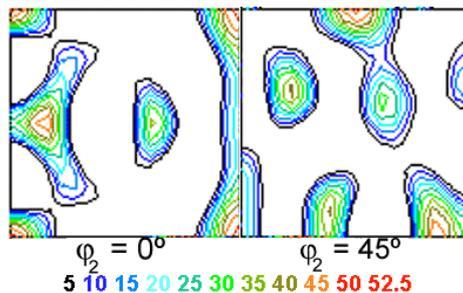


Figura 13. ODF da amostra laminada em $\langle 110 \rangle$, $\varepsilon = 0.23$

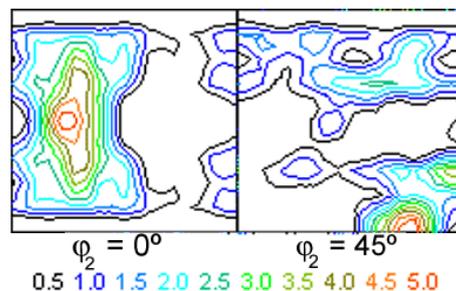


Figura 14. ODF da amostra recozida. ($\varepsilon = 0.23$ em $\langle 110 \rangle$)

Observa-se que a laminação na direção <100> apresentou pequena modificação da textura Goss original (Figura 11). Pode-se observar o surgimento de uma orientação próxima a $(1\ 1\ 4)(1\ -1\ 0)$, provavelmente relacionada às maclas de deformação. A laminação na direção <110> foi mais efetiva na modificação da textura Goss, como pode ser visto na Figura 13. O recozimento proporcionou o surgimento de componentes em torno de 15 e 35° em relação ao material deformado em ambas as direções (Figuras 12 e 14), resultado que já foi encontrado para aços elétricos de grão não orientado.⁽⁸⁾

5 CONCLUSÕES

Laminação na direção <100> provocou surgimento de maior número de maclas de deformação e pequena modificação da textura inicial Goss, em relação à laminação na direção <110>. Foram identificadas regiões macladas com orientação $(1\ 2\ 9)(-3\ -3\ 1)$, com diferença de orientação de 60° em relação ao grão Goss.

Os coeficientes de endurecimento magnético encontrados a partir da analogia à equação de Ludwik foram coerentes com os fatores de Taylor das orientações $\{110\}$ <001> e $\{110\}$ <1 -1 0>, indicando que o endurecimento magnético acompanhou a tendência do endurecimento mecânico.

O recozimento das amostras deformadas reduziu as perdas magnéticas devido à diminuição da densidade de discordâncias. A recristalização levou a uma modificação da componente Goss original, aumentando as perdas na direção <100> e diminuindo na direção <110>, em relação às amostras sem deformação. As amostras laminadas na direção <110> apresentaram tamanho de grão recristalizado inferior às amostras laminadas em <100>, indicando que houve maior encruamento na laminação em <110>.

Agradecimentos

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas pela infra-estrutura e condições de trabalho oferecidas. Aos co-autores desse trabalho, que tiveram participação ativa no planejamento e na discussão do presente trabalho e a Clarice Kunioshi, pelas análises realizadas em EBSD.

REFERÊNCIAS

- 1 SILVA, Maria do Carmo Amorim da; CAMPOS, Marcos Flavio de; LANDGRAF, Fernando Jose Gomes; FALLEIROS, Ivan Gilbert Sandoval. Textura de recristalização de um Aço com Textura (110) (001) Laminado em Diferentes ângulos em Relação a direção de Laminação. In: XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 2004, Porto Alegre. **Anais XVI Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**. 2004. p. 1-10.
- 2 F. J. G. Landgraf and M. Emura, J. Magn. Magn. Mater. **242**, 152 (2002).
- 3 M. J. Sablik, S. Rios, F. J. G. Landgraf, T. Yonamine, M. F. de Campos, J. Appl. Phys. **97**, 10E518 (2005).
- 4 L. Kestens and J.J. Jonas. Metall. Mater. Trans. A **27A**, 155 (1996).
- 5 C. S. da C. Viana “Software for Estimation of the Taylor Factor”, unpublished.
- 6 F.J. Humphreys and M. Hatherly “Recrystallization and Related Phenomena”, 2nd Ed., Pergamon, 1996.
- 7 K. P. D. Lagerlof. Acta Metall. Mater. **41**, 2143 (1993).
- 8 M. F. de Campos, F. J. G. Landgraf, I. G. S. Falleiros, G. C. Fronzaglia, H. Kahn. ISIJ Int. **44**, 1733 (2004).