

TEXTURA DE RECRISTALIZAÇÃO DE UM AÇO COM TEXTURA (110) [001] LAMINADO EM DIFERENTES ÂNGULOS EM RELAÇÃO A DIREÇÃO DE LAMINAÇÃO

Da Silva, M. C. A.¹, Campos, M. F. de², Landgraf, F. J. G.³, Falleiros, I. G. S.¹

1) Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais,

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo SP

2) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica – Escola de Engenharia Industrial

Metalúrgica de Volta Redonda – Universidade Federal Fluminense,

Av. dos Trabalhadores 420, Vila Santa Cecília, cep 27255-125, Volta Redonda, RJ

mcampos@metaleeimvr.uff.br

3) Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo SP

RESUMO

Um aço 3%Si com textura Goss (110) [001] foi submetido a redução de 25% em espessura, porém em diferentes ângulos - 0, 22,5, 45, 67,5 e 90 graus - em relação a direção de laminação. Após a laminação, procedeu-se um tratamento térmico (~700°C/1hora) ocasionando completa recristalização. Medidas de tamanho de grão recristalizado foram também efetuadas. A textura foi medida através de EBSD (“Electron Back-Scattering Diffraction Pattern”). O experimento foi planejado dentro de uma proposta de restringir variáveis, e as amostras escolhidas preenchem esse requisito, com a textura inicial consistindo apenas em um único componente de textura. Após a recristalização, observa-se diversos novos componentes de textura, ao quais geralmente apresentam diferença de orientação entre 20 a 35° em relação ao componente de textura de deformação original, o qual praticamente desaparece após recristalização. O experimento realizado indica que contornos de baixo ângulo (até 20°) têm menor mobilidade. Contornos CSL do tipo $\sigma=1$ e $\sigma=13$ foram preferencialmente observados nas amostras recristalizadas. Observou-se experimentalmente que a energia armazenada na deformação é menor para {110} (001) do que para {110} (011).

Palavras-chave: *aços elétricos, textura, recristalização*

INTRODUÇÃO

Este estudo é parte de um amplo esforço que vem sendo desenvolvido há vários anos (Campos, 2000; Falleiros & Campos 2003; Landgraf et al, 2003), com o intuito de melhor compreender a origem das texturas de recristalização em aços.

O experimento descrito neste trabalho é a laminação e recristalização de um material com uma única orientação cristalina, já previamente conhecida (Campos et al., 2003). Esta é uma maneira de restringir variáveis, evitando ambigüidades e proporcionando conclusões que não seriam acessíveis de outra maneira.

A laminação a 0° , $22,5^\circ$, 45° , $67,5^\circ$ e 90° e recristalização de um aço GO, que originalmente apresenta textura (110) [001], permite obter todo um conjunto de novas informações. Assim, seguindo essa idéia, foram realizadas laminações e recristalizações abrangendo toda a fibra (110) $\langle uvw \rangle$ (ou seja, de (110) [001] até (110) $[\bar{1}\bar{1}0]$). Em estudos anteriores (Campos et al., 2003; Da Silva et al, 2004a)), já foi discutida em detalhes a textura de deformação nesses materiais. O principal objetivo neste estudo é abordar mais especificamente a textura de recristalização.

MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado é um aço GO (3,2% Si), com espessura inicial 0,27 mm. Tiras com ângulos 0, 22,5, 45, 67,5 e 90 em relação à direção de laminação foram obtidas. Essas tiras foram laminadas até a espessura de 0,2 mm. Mais detalhes são descritos em estudo anterior (Campos et al., 2003). Após a laminação, procedeu-se um tratamento térmico ($\sim 700^\circ\text{C}/1\text{hora}$) ocasionando completa recristalização.

Medidas de textura por difração de elétrons retroespalhados (EBSD) foram obtidas em um microscópio Philips XL 30 e sistema de difração de elétrons retroespalhados da TexSEM Laboratories (TSL). As condições de operação do equipamento EBSD foram tensão de 20 kV, inclinação da amostra de 75° e distância de trabalho de 20mm (da Silva et al, 2004b). As ODFs (função distribuição de orientação) foram calculadas no software "OIM Analysis" pelo método harmônico, escolhendo ordem do harmônico esférico (L) de 16 ("default do software") e considerando que a simetria da amostra é ortotrópica.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Textura de Recristalização

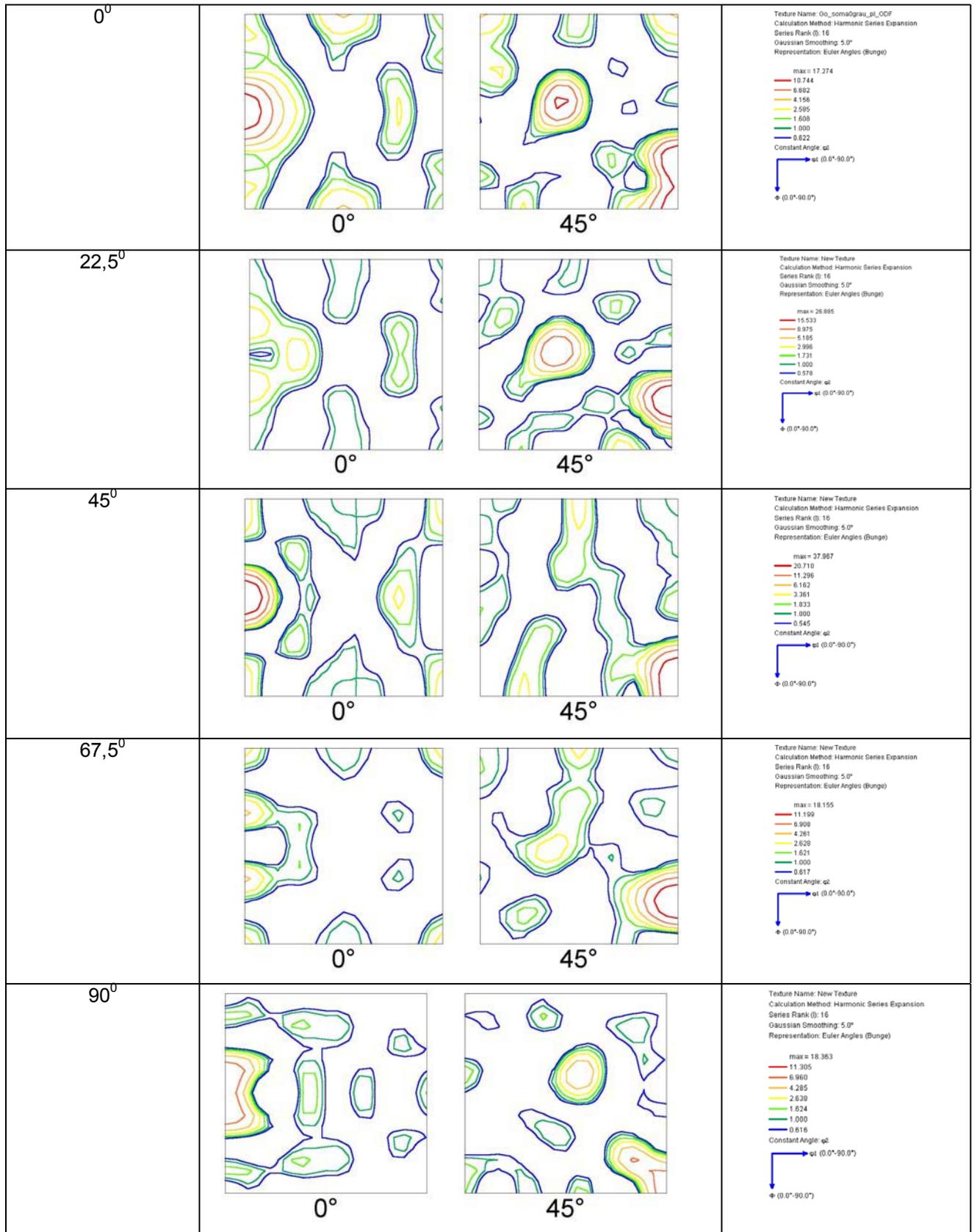


Figura 1. Textura após deformação plástica. As ODFs foram rotacionadas a 0, 22,5, 45, 67,5 e 90°, para manter como referência DL a direção de laminação do material original, com 0,27mm de espessura. Notação de Bunge.

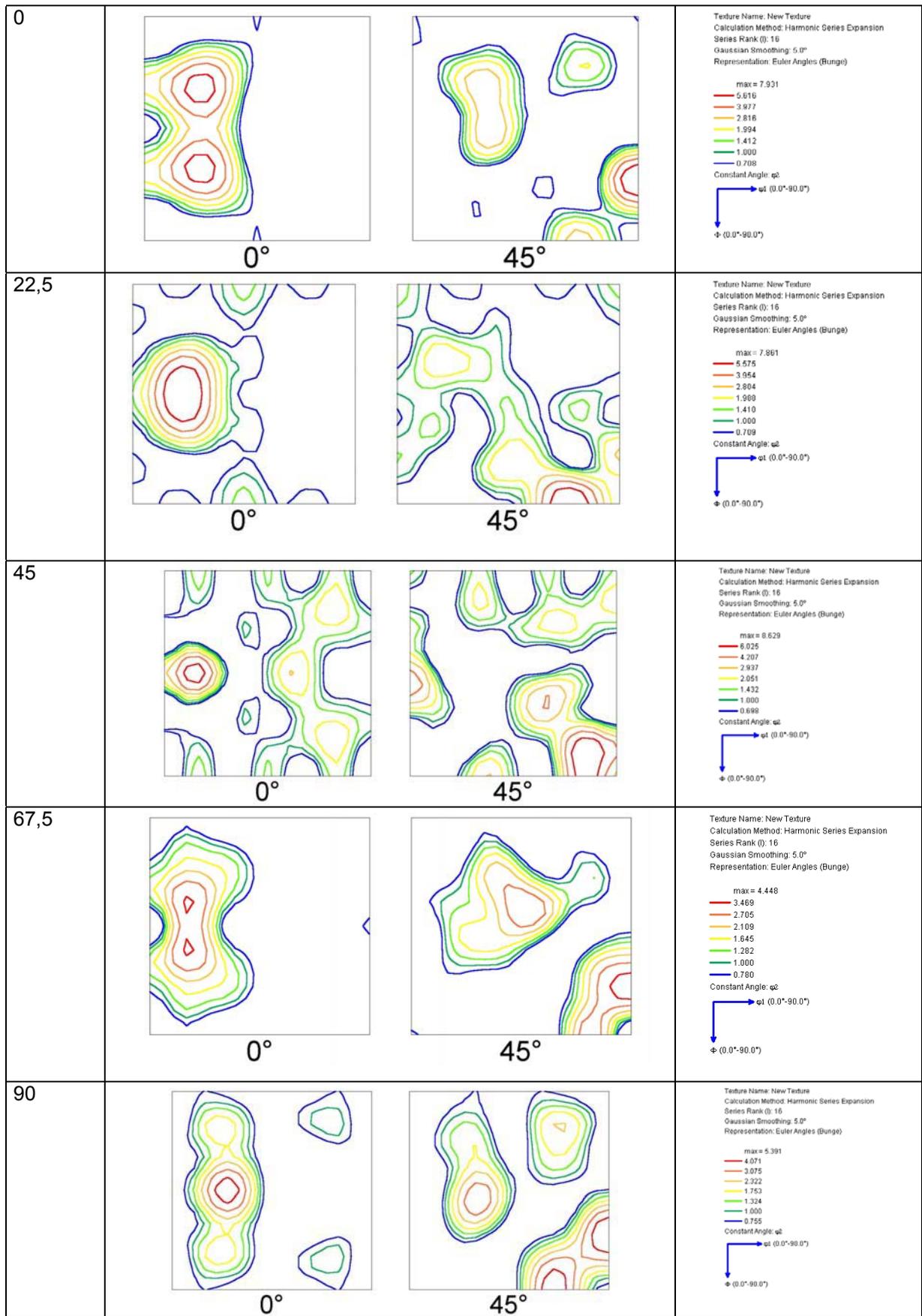
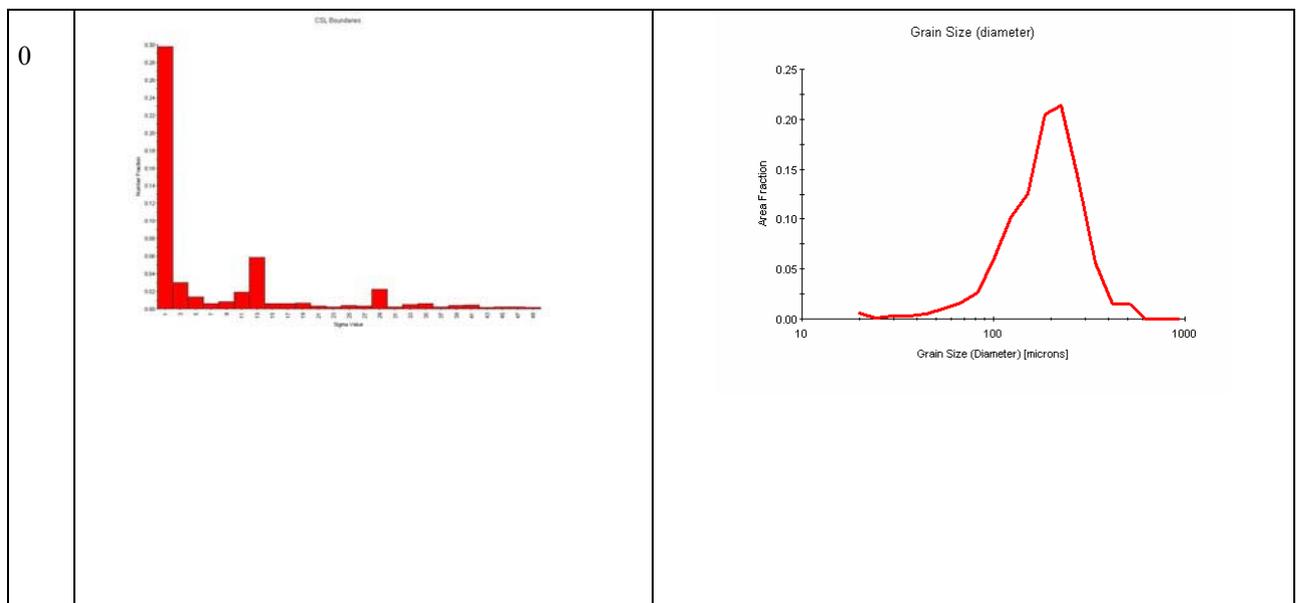


Figura 2. Textura após recristalização. As ODFs foram rotacionadas a 0, 22,5, 45, 67,5 e 90°, seguindo a rotação do estado deformado. Notação de Bunge.

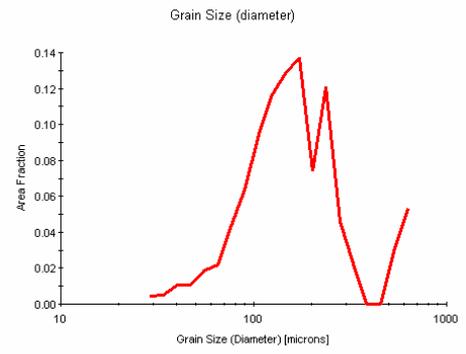
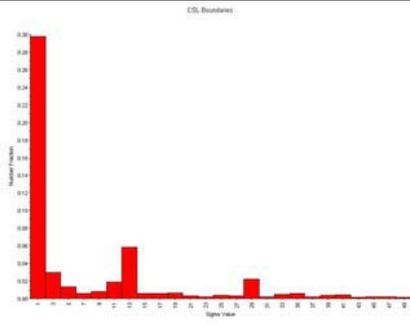
A comparação entre as figuras 1 e 2 mostra que, após a recristalização, diversos componentes de textura surgem a partir de um único componente de textura inicial, sendo que os novos componentes de textura apresentam tipicamente diferença de orientação de entre 20 a 35° do componente de textura de deformação original, o qual praticamente desaparece após recristalização. Isto foi observado para todo o conjunto de amostras que inclui os ângulos de 0°, 22,5°, 45°, 67,5° e 90° (Figura 2). O componente de Textura Goss diminui drasticamente de intensidade, porém os principais componentes que surgem no material recristalizado estão tipicamente a 15°-35° graus da orientação Goss. Existe uma randomização da textura após a recristalização, pois a intensidade máxima na ODF dos materiais recristalizados (Figura 1) é bem inferior à dos materiais deformados (Figura 2).

Contornos CSL do tipo sigma=1 e sigma=13 foram preferencialmente observados nas amostras recristalizadas (Figura 3). O sigma=13 observado pode ser de ambos os tipos de contornos sigma13 possíveis: 13a 22,62° em torno do eixo <100> e 13b 27,80° em torno do eixo <111>.

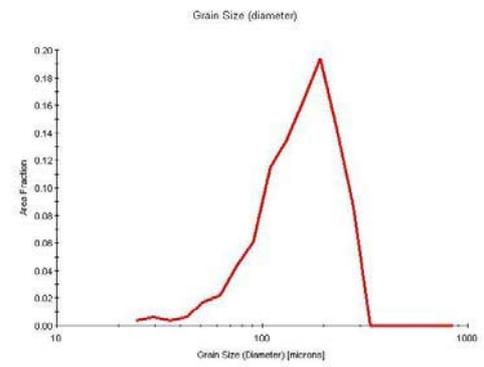
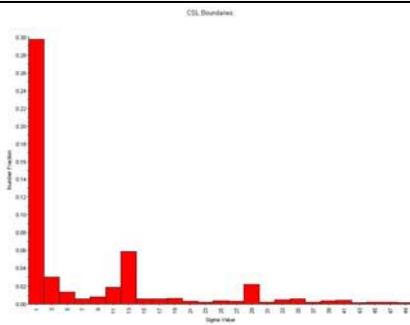
Os dados da Figura 2 mostram que, após recristalização existe o predomínio de apenas três principais componentes de textura: i) (011) [3 -1 1], a ~25° em relação a Goss ii) (332) [-1 -1 3], também a ~25° em relação a Goss e iii) um componente em torno de (112) [4 -10 3], abrangendo (337) [2 -9 3] e (445) [4 -9 4]. Convém notar que resultado similar, ou seja, poucos componentes de textura de recristalização quando a textura de deformação também é composta por poucos componentes, foi recentemente observado por Yonamine & Landgraf (2003), que reportaram que a recristalização do componente de textura de deformação {100} <011> originou um único principal componente de textura (114) [-1 -3 1].



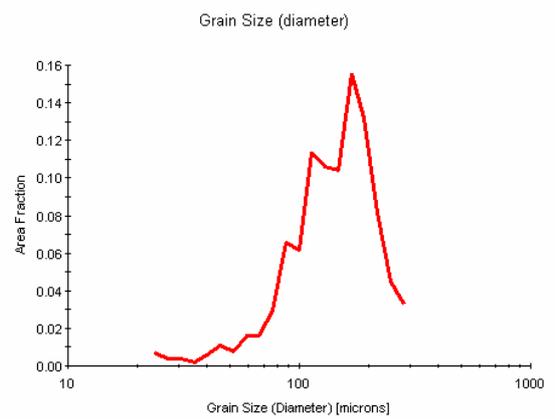
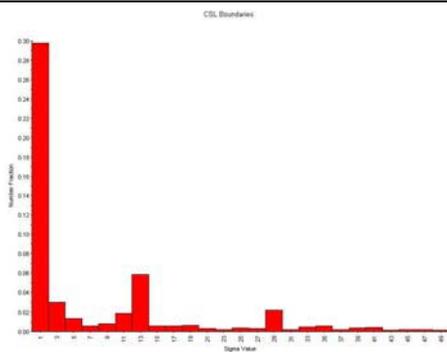
22,5



45



67,5



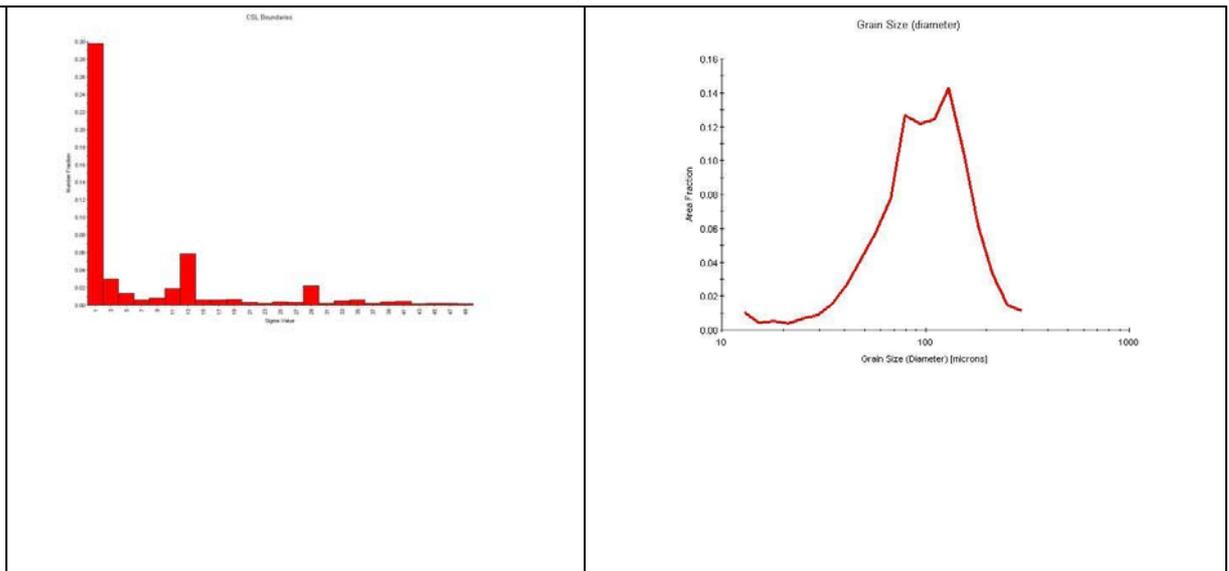


Figura 3. Gráfico de contornos “CSL” (“coincidence site lattice”) e de tamanho de grão para as amostras recristalizadas. Dados obtidos através de EBSD.

A energia armazenada na deformação

Tabela 1. Grau de redução e alongamento para as diferentes amostras

Ângulo (°)	Redução (%)	Alongamento Longitudinal (%)	Alongamento Transversal (%)
0	25,9	33,9	2,5
22,5	25,9	36,9	3,3
45	25,9	32,4	5,0
67,5	24,1	21,3	12,5
90	23,0	18,1	16,7

Durante o processo de deformação plástica, notou-se a existência de fortes efeitos de anisotropia (ver Tabela 1). A chapa a 90° alargou-se muito mais que as outras, e esse efeito foi contínuo em função do ângulo. O número de passes até se atingir a espessura de 0,2 mm foi maior para a chapa 90° (o número de passes foi também muito alto no caso da amostra 67,5°). Isso sugere que, após o processo de deformação, as amostras 90° e 67,5° tenham ficado mais encruadas do que as outras.

O fator de Taylor indica que, para o ângulo de 90°, o encruamento deve ser maior. O fator M de Taylor varia bastante ao longo da fibra $\{110\} \langle uvw \rangle$, desde $M < 2,2$ no caso de orientação Goss (110) [001] até $M > 4,1$ para orientação (110) $[\bar{1} \bar{1} 0]$ (Figura 4). A figura 3 mostra que o tamanho de grão tende, continuamente, a decrescer quando o ângulo de laminação vai de 0 a 90°. Maior energia armazenada na deformação implica em menor tamanho de grão final. Embora este seja um método

indireto, o procedimento aqui descrito é um método experimental de obter informações sobre a energia armazenada na deformação. Assim, existe uma correlação entre o Fator M de Taylor e a energia armazenada na deformação determinada experimentalmente.

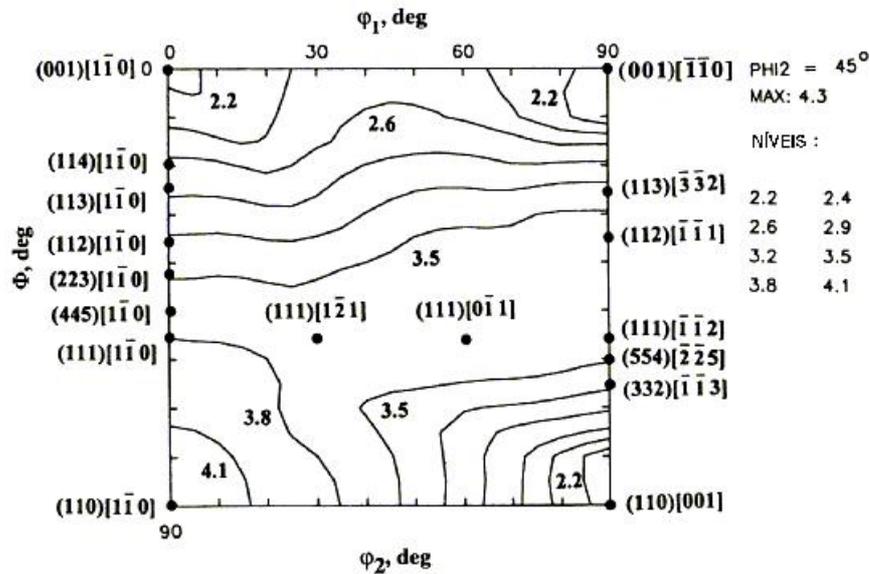


Figura 4. Coeficiente M de Taylor para materiais com estrutura CCC, calculado seguindo o modelo FC "full-constraint" (Ray et al., 1994). Seção $\phi_2=45^\circ$. Notação de Bunge.

CONCLUSÕES

Após recristalização, diversos componentes de textura surgem a partir de um único componente de textura inicial, sendo que os novos componentes de textura apresentam tipicamente diferença de orientação de entre 15 a 35° do componente de textura de deformação original, o qual praticamente desaparece após recristalização. Após recristalização existe o predomínio de apenas três principais componentes de textura: i) (011) [$\bar{3} -1 1$], a ~25° em relação a Goss ii) (332) [$-1 -1 3$], também a ~25° em relação a Goss e iii) um componente em torno de (112) [$4 -10 3$], abrangendo (337) [$2 -9 3$] e (445) [$4 -9 4$].

O experimento realizado indica que contornos de baixo ângulo (até 15°) têm menor mobilidade e que a recristalização conduz a uma randomização da textura. Existe um predomínio dos contornos CSL sigma =1 e sigma=13 nas amostras recristalizadas.

O método indireto idealizado para obter informações sobre a energia armazenada na deformação permitiu observar experimentalmente que a energia armazenada na deformação é menor para {110} (001) do que para {110} (011).

Agradecimentos

M.C.A da Silva agradece ao CNPq pela bolsa de doutorado concedida, M.F.de Campos agradece à Capes (programa ProDoc) e à FAPESP processo 01/09122-4. À Clarice Terui Kuniooshi pela assistência na utilização do microscópio. À FAPESP processo 99/10796-8.

Referências Bibliográficas

Campos M. F. de; Microestrutura, textura e propriedades magnéticas em aços elétricos **Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**, fevereiro de 2000.

Campos, M. F. de; Falleiros, I.G.S.; Landgraf, F.J.G. Laminação e recristalização de aços 3,2 %Si com texturas (1 1 0) [0 0 1] e (1 1 0) [1 $\bar{1}$ 0]. In **1º Conferência Brasileira sobre Temas de Tratamento Térmico - TTT**. Junho de 2003. Indaiatuba, São Paulo SP (em CD-ROM).

Da Silva , M.C.A, De Campos, M.F.,Landgraf, F.J.G., Falleiros, I.G.S, Textura de deformação de um aço GO laminado a 0; 22,5; 45; 67,5 e 90 graus em relação à direção de laminação. **Congresso Anual da ABM**, julho 2004a.

Da Silva , M.C.A, Landgraf, F.J.G., Falleiros, I.G.S, Evolução da Textura de deformação de um aço elétrico GNO com 1,25% de Si. **Congresso Anual da ABM**, julho 2004b.

Falleiros I.G.S.; Campos, M. F. de Nucleação da Recristalização. In: **Textura e relações de orientação: deformação plástica, recristalização, crescimento de grão**. Ed: AP TSCHIPTSCHIN et al. IPEN, 2003, p. 55-70.

Landgraf, F.J.G.; Takanoashi, R.; Campos, M.F.de Tamanho de grão e textura dos aços elétricos de grão não-orientado. In: **Textura e relações de orientação: deformação plástica, recristalização, crescimento de grão**. Ed: AP TSCHIPTSCHIN et al. IPEN, 2003, p. 211-246.

Ray, R. K.; Jonas, J. J.; Hook, R. E.. Cold rolling and annealing textures in low carbon and extra low carbon steels. **Int. Mat. Rev.**, v. 39, n. 4, p. 129-172, 1994.

Yonamine, T.; Landgraf, F. J. G. Approaching {100}<0vw> by rolling directionally solidified silicon steels. . In: **Textura e relações de orientação: deformação plástica, recristalização, crescimento de grão**. Ed: AP TSCHIPTSCHIN et al. IPEN, 2003, Anais (em CD-ROM).

RECRYSTALLIZATION TEXTURE OF A STEEL WITH (110) [001] TEXTURE ROLLED FOR DIFFERENT ANGLES IN COPARISON WITH THE ORIGINAL ROLLING DIRECTION

ABSTRACT

A 3% Si oriented electrical steel with Goss texture (110) [001] was submitted to a 25% of reduction, however for different angles-0, 22,5, 45, 67,5 e 90 degrees in comparison with the original rolling direction. A heat treatment (at $\sim 700^{\circ}\text{C}/1\text{ h}$) was applied, resulting in complete recrystallization. EBSD ("Electron Back-Scattering Diffraction Pattern") technique allowed to determine the grain size and the texture. The rolling texture had only one component of texture, Goss. After recrystallization, several new components were observed. These new texture components are in the range $20^{\circ} - 35^{\circ}$ in comparison with the main rolling texture component. The Goss component tend to disappear with the recrystallization. Thus, this data indicates that $<20^{\circ}$ boundaries have less mobility. CSL boundaries of types $\sigma=1$ and $\sigma=13$ were the most significant in the recrystallized samples. It was experimentally determined that the stored energy due the deformation is lower for $\{110\} (001)$ than $\{110\} (011)$.

Key-words: electrical steels, texture, recrystallization