

# EFEITO DO RECOZIMENTO NA MICROESTRUTURA DE AÇO ELÉTRICO SEMI-PROCESSADO <sup>1</sup>

*Fernando J.G. Landgraf<sup>2</sup>  
Nicolau A. Castro<sup>2,3</sup>  
Ivan G.S. Falleiros<sup>3</sup>  
Taeko Yonamine<sup>2</sup>  
Marcos F. de Campos<sup>4</sup>*

## **Resumo**

O objetivo desse trabalho é investigar os mecanismos de recristalização de aços elétricos submetidos a baixas deformações. Análises de textura e frequência de CSL (sítios de coincidência de rede) foram utilizadas na interpretação dos resultados. Dois principais mecanismos de recristalização são citados: SIBM (migração de contornos de grão induzida por deformação) e recristalização primária. Os resultados encontrados nesse trabalho são favoráveis à recristalização primária.

**Palavras-chave:** Recristalização; SIBM; CSL; Aço elétrico.

<sup>1</sup> 60º Congresso Anual da ABM – Belo Horizonte – Julho de 2005

<sup>2</sup> IPT - Laboratório de Metalurgia do Pó e Materiais Magnéticos.

<sup>3</sup> EPUSP - Departamento de Metalurgia e Materiais

<sup>4</sup> Universidade Federal Fluminense

## 1 INTRODUÇÃO

Foram investigados os efeitos da laminação de encruamento e do recozimento no tamanho de grão, textura e CSL (sítios de coincidência de rede) de aços elétricos semiprocessados. Foram realizadas análises em EBSD (difração de elétrons retroespalhados) em amostras deformadas e recozidas.

Esse estudo é de grande importância para o entendimento dos mecanismos de recristalização de aços elétricos semiprocessados e as variáveis que controlam a textura final e propriedades magnéticas dessas chapas.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram produzidas amostras com  $\epsilon$  de 0 a 0,10, a partir de chapa com 0,6 mm de espessura, em laminador com cilindros de 127 mm de diâmetro. As amostras foram recozidas a 760°C por 2 horas em forno com atmosfera controlada (90% N<sub>2</sub> e 10% H<sub>2</sub>). Foram preparadas metalografias para determinação de tamanho de grão após o recozimento. As amostras foram analisadas em EBSD, antes e após o recozimento, obtendo-se os valores da frequência de CSL. As mesmas amostras foram analisadas em difratômetro de raios-X Shimadzu modelo XRD-6000, equipado com goniômetro de textura. Os resultados estão apresentados em ODF (função distribuição de orientação).

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Composição Química

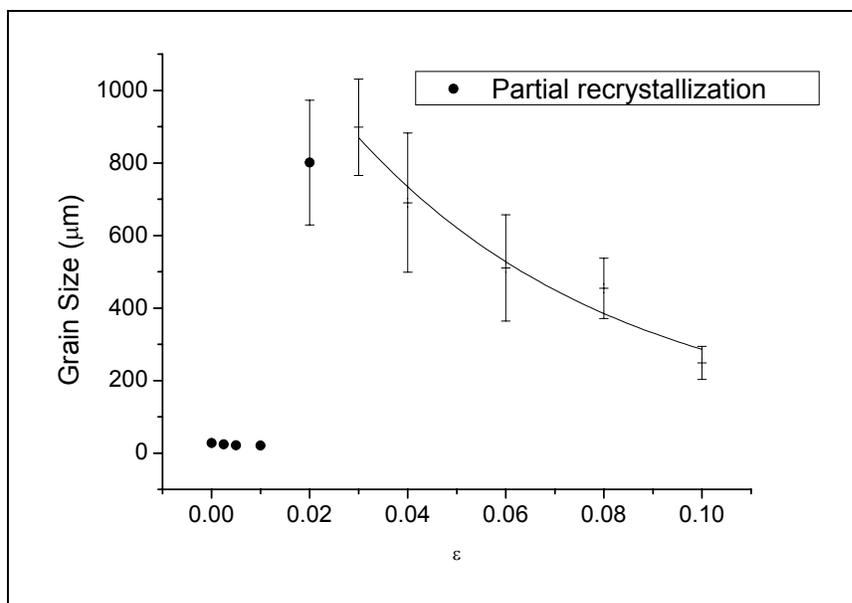
A composição química da chapa de origem está apresentada na Tabela 1.

**Tabela 1.** Composição química da chapa de origem

Elemento	Teor
C	50 ppm
Mn	0,43%
Si	0,08%
S	110 ppm
P	150 ppm

### 3.2 Tamanho de Grão

As amostras laminadas e recozidas foram analisadas em microscópio óptico e os valores de tamanho de grão foram obtidos. A Figura 1 apresenta os valores encontrados.



**Figura 1.** Efeito da deformação no tamanho de grão após recozimento

Foi possível observar que apenas para  $\epsilon$  a partir de 0,03 houve recristalização total. Para deformações inferiores ainda foram observados grãos pequenos, não recristalizados. Existe uma dependência entre tamanho de grão recristalizado e deformação. Quanto maior a deformação menor o tamanho de grão recristalizado. Esse resultado é uma evidência de que houve recristalização primária. Além disso, outros experimentos [1] indicam que o tamanho de grão final independe da temperatura do recozimento, fortalecendo a hipótese de recristalização primária.

O tamanho de grão das amostras recozidas foi superior ao encontrado para aços elétricos semiprocessados industriais. Para amostras comerciais ( $\epsilon = 0,06$ ) o tamanho de grão encontrado é de aproximadamente  $150 \mu\text{m}$ , contra  $500 \mu\text{m}$  para a mesma deformação na amostra produzida em laboratório. É importante mencionar que não houve crescimento de grão colunar durante o recozimento das amostras. Em amostras comerciais com teores de carbono acima de aproximadamente 200 ppm é comum a formação de grãos colunares durante o tratamento térmico final, realizado em atmosfera descarbonetante ( $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$ ). Além disso, a presença de carbono pode modificar a cinética de recristalização, devido à redução da mobilidade de contornos de grão provocada pelo “solute drag” ou pela formação de austenita a temperaturas de  $760^\circ\text{C}$ .

### 3.3 Medidas de Dureza

Foram analisadas amostras sem deformação e com  $\epsilon$  de 0,06, em microdurômetro Fischerscope. Utilizou-se carga de 10 g em seção longitudinal das chapas. Foram medidas as durezas da superfície e do centro das amostras para identificar gradientes de deformação entre superfície e centro da chapa. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 2.

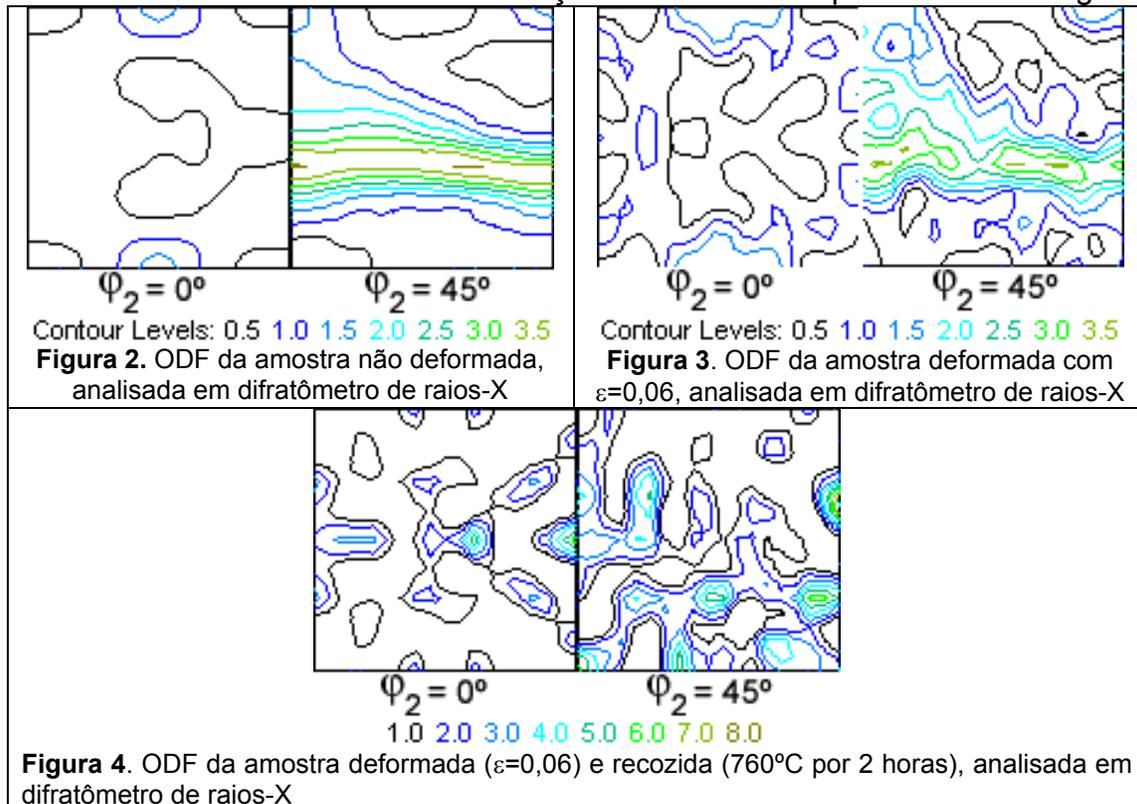
**Tabela 2.** Medidas de dureza Fischerscope

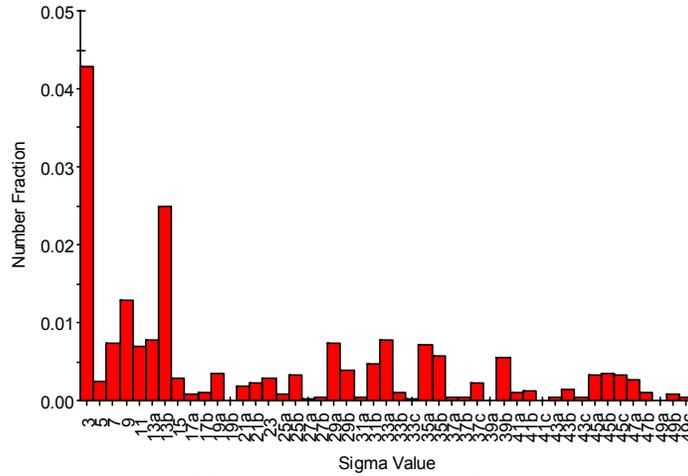
Deformação ( $\epsilon$ )	Dureza (HV)	
	superfície	centro
0	125±6	125±6
0.06	153±8	146±6

Não foi possível observar gradiente de dureza na amostra deformada. Considerando-se o desvio padrão, não há diferença entre superfície e centro. Esse resultado vai contra uma hipótese frequentemente assumida, de que a deformação plástica do passe de encruamento (skin-pass) concentra-se na superfície do material, e que o aumento do tamanho de grão inicia-se na superfície devido ao maior encruamento da superfície.

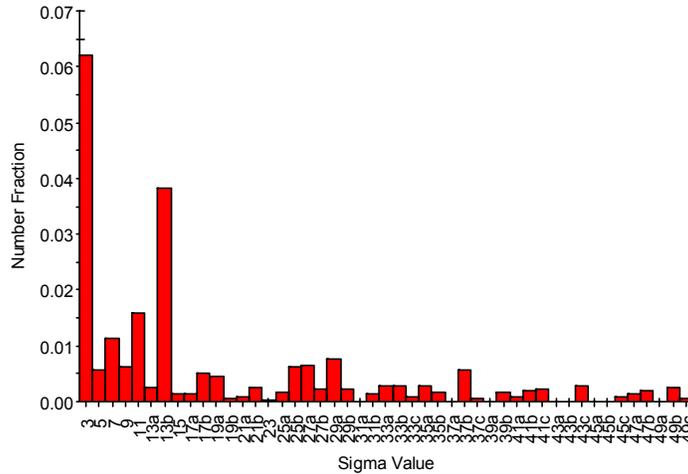
### 3.4 Análise de Textura e CSL

A amostra não deformada e com  $\epsilon$  de 0,06 (antes e após o recozimento) foram analisadas. As ODFs e a distribuição de CSL estão apresentadas a seguir.

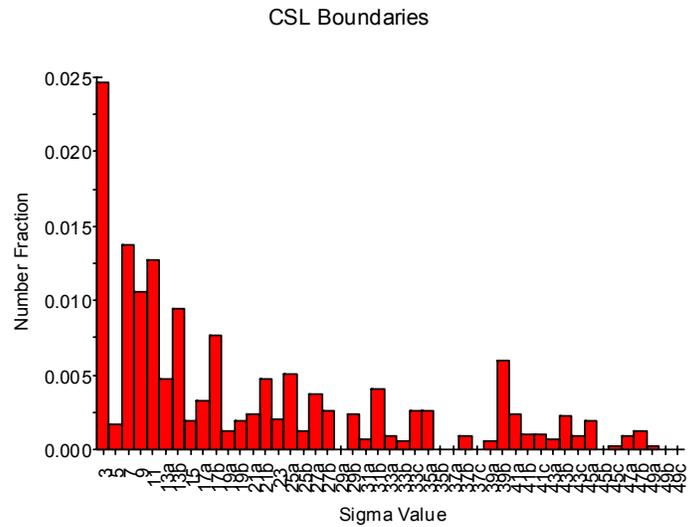




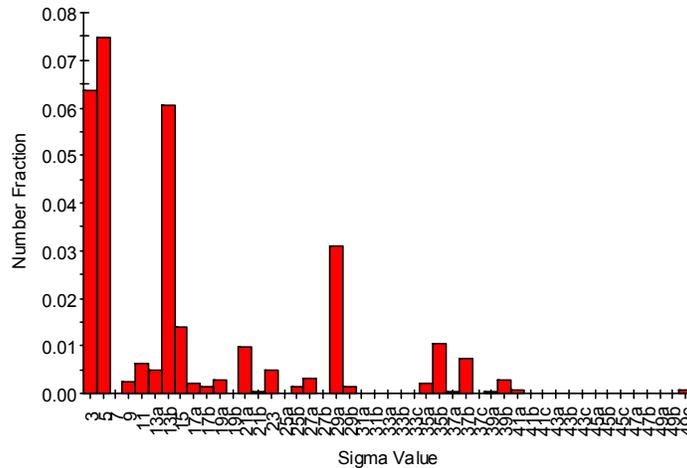
**Figura 5.** Distribuição de CSL em amostra não deformada, analisada em EBSD



**Figura 6.** Distribuição de CSL em amostra deformada ( $\epsilon = 0,06$ ), analisada em EBSD



**Figura 7.** Distribuição de CSL em amostra deformada ( $\epsilon = 0,06$ ) e recozida por 5 minutos, analisada em EBSD



**Figura 8.** Distribuição de CSL em amostra deformada ( $\epsilon = 0,06$ ) e recozida por 2h, analisada em EBSD

As Figuras 3 e 4 mostram que a amostra deformada ( $\epsilon = 0,06$ ) apresenta forte fibra gama com máximo em  $(6\ 5\ 8) \langle 2\ \bar{4}\ 1 \rangle$ . Após o recozimento, orientações próximas a  $\{1\ 1\ 1\}$  continuam existindo e grãos próximos de Goss aumentaram de intensidade, enquanto que a componente cubo rodado não aumentou. Esse resultado é contrário à hipótese de que o fator de Taylor (que descreve, teoricamente, o efeito da orientação cristalina no grau de encruamento) dominaria a seleção de orientações no SIBM (migração de contornos de grão induzida por deformação): grãos  $\{1\ 1\ 1\}$  armazenam maior energia durante a deformação e devem ser consumidos por grãos Goss e cubo rodado, que armazenam menor energia [2]. Entretanto, apesar dos resultados confirmarem o aumento da componente Goss após a recristalização de chapas submetidas a baixas deformações [3], o mesmo não é normalmente observado quanto à componente “cubo rodado”. Esse fato foi observado por Rollett [4]. Deve-se notar que a literatura menciona que componentes  $\{1\ 0\ 0\} \langle 0\ 1\ 2 \rangle$  e  $\{1\ 2\ 0\} \langle 1\ 1\ 0 \rangle$  aumentam em alguns casos, segundo Takashima [5], Boer e Wieting [6].

As Figuras 5 e 6 mostram a distribuição de CSL em amostra recozida e após deformação ( $\epsilon = 0,06$ ), obtida a partir de EBSD analisada pelo TSL software OIM. Os resultados são bem semelhantes, onde é possível observar a presença de  $\Sigma 3$  e  $\Sigma 13b$  em maior quantidade. Após 5 minutos de recozimento a  $760^\circ\text{C}$ , quando o aumento de tamanho de grão já havia iniciado, não foi percebida mudança significativa na distribuição de CSL, Figura 7. Após 2h, quando o aumento do tamanho de grão já se completou, observou-se uma mudança na distribuição de CSLs, com aumento da fração de  $\Sigma 5$  (Figura 8), entre grãos próximos de Goss e  $\{1\ 1\ 1\}$ . Randle defendeu a hipótese de que trata-se de recristalização secundária [7], baseando-se em evidências de que, durante o período de “incubação”, haveria um aumento da frequência de contornos CSL, que tem maior mobilidade que os aleatórios. O processo seria regido não pelo potencial termodinâmico associado à deformação do material (que seria recristalização primária), mas sim pela mudança da mobilidade de certos contornos, o que configuraria Recristalização Secundária. No presente trabalho não foi possível confirmar evidências que

comprovem essa teoria.

Contornos do tipo  $\Sigma 3$  foram observados em maclas de recozimento.  $\Sigma 3$  e  $\Sigma 13b$  também são normalmente encontrados em aços elétricos semiprocessados comerciais, após o recozimento final, que apresentam forte fibra gama.

#### 4 CONCLUSÕES

- O aumento da intensidade de orientações próximas de Goss após o recozimento é favorável à teoria de SIBM, com encruamento baseado no fator de Taylor, porém a presença de orientações próximas a  $\{1\ 1\ 1\}$  e o não crescimento de cubo rodado não confirmam essa hipótese.
- A dependência entre tamanho de grão e grau de deformação, assim como a fraca relação entre tamanho de grão e temperatura de recozimento são favoráveis a teoria de recristalização primária.
- Não foram encontradas evidências de aumento da frequência de CSL no estágio inicial da recristalização, não confirmando a “incubação” do SIBM defendida por Randle.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 F.J.G. Landgraf, R. Takanohashi and M.F. de Campos, in: *Textura e Relações de orientação*, ed. A.P. Tchiptschin et al (S.Paulo, Brazil: IPEN 2003) 211-246.
- 2 S.W Cheong.; E.J Hilinski; A.D. Rollett, *Metall. and Mat. Trans. A*, 34A (2003), 1321-1327.
- 3 E.T. Stephenson, and M.R. Amann, In: *Energy Efficient Electrical Steels*, ed. A.R. Marder and E.T. Stephenson (Warrendale, PA: The Metallurgical Society of AIME, 1981) 43-60.
- 4 Rollett,
- 5 M. Takashima: M. Komatsubara and N. Morito, *ISIJ Int.*, 37 (1997),1263-1268
- 6 B. de Boer, J. Wieting, “Formation of a near  $\{001\}<110>$  recrystallization texture in electrical steels”, *Scripta Materialia*, 37 (1997) 753.
- 7 V. RANDLE.; Strain – Induced Secondary Recrystallisation; Materials Science Forum; 1993; Vols. 113 – 115; pp. 189-194.

# EFFECT OF ANNEALING ON THE MICROSTRUCTURE OF A SEMI-PROCESSED ELECTRICAL STEEL

*Fernando J.G. Landgraf  
Nicolau A. Castro  
Ivan G.S. Falleiros  
Taeko Yonamine  
Marcos F. de Campos*

## **Abstract**

The objective of this paper is to investigate the recrystallization mechanisms of electrical steels after small deformation. Texture and CSL frequency analysis were used in the interpretation of results. Two main mechanisms are discussed, Strain Induced Boundary Migration (SIBM) and primary recrystallization, and the results seem to favour the last one.

**Key-words:** Recrystallization, SIBM, CSL, Electric steel.