

# RECRISTALIZAÇÃO E TEXTURA DE AÇOS ELÉTRICOS SEMIPROCESSADOS

Nicolau Apoena Castro <sup>1,2</sup>  
 Fernando José Gomes Landgraf <sup>1</sup>  
 Verner Volfram Wolgast <sup>3</sup>  
 Augusto César Lacerda de Oliveira <sup>3,4</sup>  
 Marcos Flavio de Campos <sup>5</sup>

## Resumo

O efeito do tamanho de grão da BQ (bobina quente) na textura final de aços elétricos semiprocessados foi investigado. Amostras foram produzidas a partir de BQs com tamanho de grão de 20 $\mu$ m e 200 $\mu$ m. Foram analisadas propriedades magnéticas, textura e microestrutura. Após o recozimento final, observou-se forte anisotropia magnética nas amostras produzidas a partir da BQ com maior tamanho de grão, indicando a presença de textura com forte componente Goss.

**Palavras-chave:** Aço elétrico; Textura; Propriedades magnéticas; Recristalização.

## RECRYSTALLIZATION AND TEXTURE OF SEMIPROCESSED ELECTRICAL STEELS

### Abstract

The effect of hot band grain size on the final texture of semi-processed electrical steels was investigated. Samples were produced from hot bands with grain sizes of 20 and 200 $\mu$ m. Microstructure, texture and magnetic properties were analyzed. After the final annealing, strong magnetic anisotropy was observed in the sample produced from the larger hot band grain size sample, indicating the presence of Goss texture component.

**Key words:** Electric steel sheets; Texture; Magnetic properties; Recrystallization.

## 1 INTRODUÇÃO

A maior parte da literatura discute o efeito do tamanho de grão da BQ (bobina quente) na textura de aços totalmente processados, ou seja, submetidos à laminação a frio e recozimento.<sup>(1)</sup> O objetivo deste trabalho é investigar o efeito do tamanho de grão da bobina quente nas propriedades magnéticas e textura final de aços elétricos semiprocessados, ou seja, após laminação em duas etapas.

Trabalho anterior discutiu o efeito do tamanho de grão da bobina quente em aço laminado a quente em laboratório.<sup>(2)</sup> Nesse trabalho partiu-se de bobina quente produzida industrialmente e a laminação a frio foi realizada em laminador piloto. A textura cristalográfica, análise microestrutural e caracterização magnética das amostras após cada etapa do processo (laminagens e tratamentos térmicos) foram analisadas.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

As amostras foram produzidas a partir de bobina quente fornecida pela CSN. A composição química do material é apresentada na Tabela 1. Foram utilizadas amostras de BQ como recebidas (tamanho de grão de aproximadamente 20  $\mu$ m) e amostras com tamanho de grão de aproximadamente 200  $\mu$ m. Para aumentar o tamanho de grão foi utilizado procedimento semelhante ao de aços elétricos semiprocessados, como ilustra a Figura 1. As amostras foram laminadas a frio com redução de área de 80%, recozidas a 760°C por duas horas em atmosfera de N<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>, passaram por laminação de encruamento e recozimento final a 760°C por duas horas (N<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>) como mostra a Figura 2.

Tabela 1. Composição química da BQ

Elemento	Teor (%)
C	0.006
Mn	0.4
P	0.1
Si	0.4
Al	0.25

<sup>1</sup> Epusp - Departamento de Metalurgia e Materiais

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

<sup>3</sup> Centro de Pesquisas da Companhia Siderúrgica Nacional

<sup>4</sup> Universidade Federal Fluminense

<sup>5</sup> Inmetro - Divisão de Metrologia de Materiais

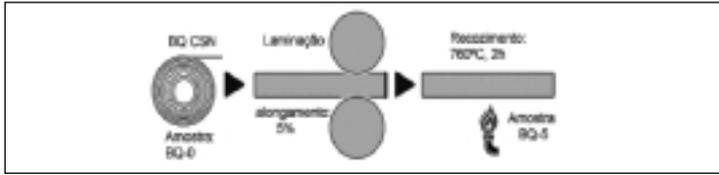


Figura 1. Preparação da BQ

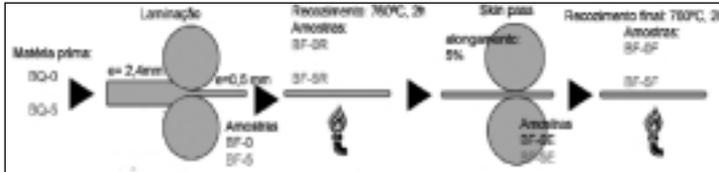


Figura 2. Preparação da BF

Foram preparadas metalografias das amostras para caracterização microestrutural em microscópio óptico. A caracterização magnética foi realizada em lâmina solteira, num instrumento Soken DAC-BHW-5, determinando os valores de  $B_{50}$  e perdas magnéticas (1,5T/60Hz e 1,0T/60Hz). A textura das amostras foi analisada em difratômetro de raios-X Shimadzu (DRX-6000) equipado com goniômetro de textura. Os resultados foram apresentados em ODF (orientation distribution function) e serão discutidos a seguir.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Caracterização Microestrutural

Foram preparadas metalografias da seção longitudinal das amostras atacadas com Nital 5%. As imagens obtidas por microscopia óptica estão apresentadas a seguir.

As imagens mostram que a BQ-0, como recebida, apresenta tamanho de grão de aproximadamente 20  $\mu\text{m}$  (Figura 3). O procedimento para aumentar o tamanho de grão da BQ foi realizado com sucesso, aumentando para aproximadamente 200  $\mu\text{m}$  como se pode observar na Figura 7. É possível observar também a deformação ocorrida durante a laminação a frio (Figuras 4 e 8) pelo surgimento de grãos alongados. O tratamento térmico realizado recristalizou completamente as amostras BF-0R e BF-5R (Figuras 5 e 9), porém o tamanho de grão encontrado após a recristalização foi maior do que o esperado para uma redução de área a frio de 80%. Tal fato se deve ao longo tempo do tratamento térmico (760°C por duas horas), que deve ter levado a um crescimento de grão após a recristalização. No recozimento contínuo industrial, a chapa fica a essa temperatura por poucos segundos, não ocorrendo crescimento de grão. Nesse caso o tamanho de grão após a recristalização fica em torno de 10  $\mu\text{m}$ , bem inferior ao encontrado nas amostras BF-0R e BF-5R, que apresentaram tamanhos de grão de 40  $\mu\text{m}$  e 100  $\mu\text{m}$  respectivamente. É importante discutir também a diferença entre o tamanho de grão obtido nas amostras BF-0R e BF-5R. A densidade de discordâncias após a deformação depende do tamanho de grão inicial. Quanto maior o tamanho de grão menor a densidade de discordâncias,<sup>(3)</sup> gerando tamanhos de grão maiores após a recristalização. Além disso, quanto maior o tamanho de grão menor será a área de contornos de grão

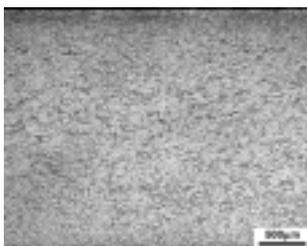


Figura 3. Microscopia óptica da amostra BQ-0



Figura 4. Microscopia óptica da amostra BF-0

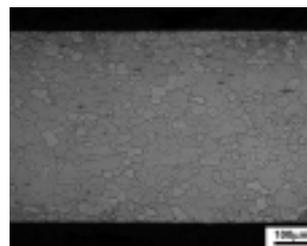


Figura 5. Microscopia óptica da amostra BF-0R

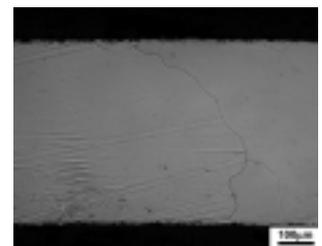


Figura 6. Microscopia óptica da amostra BF-0F

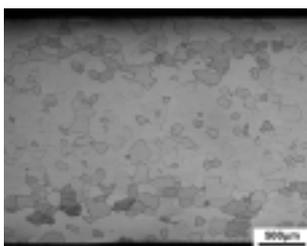


Figura 7. Microscopia óptica da amostra BQ-5

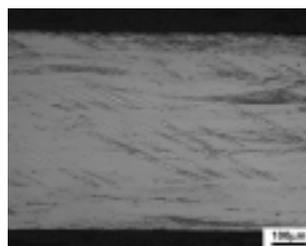


Figura 8. Microscopia óptica da amostra BF-5

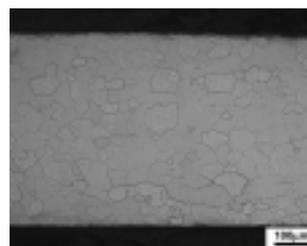


Figura 9. Microscopia óptica da amostra BF-5R

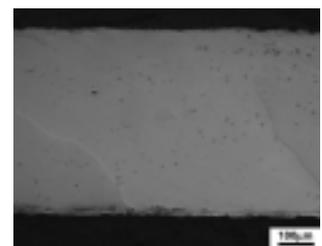


Figura 10. Microscopia óptica da amostra BF-5F

por volume de amostra. Como o contorno de grão é um local preferencial para nucleação, é possível que o aumento do tamanho de grão da BQ tenha reduzido o número de núcleos formados durante a recristalização, logo quanto maior o tamanho de grão da BQ, maior o tamanho de grão da BF recristalizada.

As amostras BF-0F e BF-5F (Figuras 6 e 10) indicam que a laminação de encruamento seguida de recozimento provoca um aumento acentuado do tamanho de grão. Em ambos os casos os grãos são maiores do que a espessura da chapa (0,5mm). Industrialmente o tamanho de grão de aços semiprocessados após o recozimento final fica em torno de 150  $\mu\text{m}$ . Essa diferença deve-se provavelmente à laminação de encruamento. O efeito de variáveis da laminação de encruamento (velocidade de laminação, tamanho e rugosidade do cilindro, tensão avante e a ré) no tamanho de grão final de aços semiprocessados está sendo estudado e pode explicar esse comportamento distinto entre amostras industriais e produzidas em laboratório. Esse estudo será importante para melhorar a simulação do processo industrial de aços elétricos semiprocessados em laminadores piloto.

### 3.2 Análise de Textura

Foram preparadas amostras para análise em difração de raios-X com goniômetro de textura. O procedimento adotado foi o lixamento e polimento de seção paralela ao plano de laminação até a “meia-espessura”. Esse procedimento foi adotado para que fosse analisada uma amostra representativa do material, evitando a superfície,

que normalmente apresenta comportamento diferenciado. A seguir estão apresentados os cortes  $\varphi_2=45^\circ$  das ODF das amostras, segundo a representação de Bunge.

As Figuras 11 e 16 mostram que as BQs apresentam forte textura (100)<110> (cubo rodado). A BQ-5 apresentou um reforço dessa textura, que passou de intensidade 4 para 13. Após a laminação a frio e recozimento as amostras passaram a ter uma forte componente (111)<112>, como pode ser observado nas Figuras 13 e 18. Era esperado surgimento de componente Goss ((110)<100>) para a BF-5R. De acordo com a literatura,<sup>(4,5)</sup> um aumento do tamanho de grão da BQ favorece a nucleação de grãos com orientação de Goss. A ausência dessa componente pode estar relacionada ao longo tempo de tratamento térmico utilizado (760°C por duas horas). Esse tratamento levou a um crescimento de grão, o que pode reduzir essa componente.<sup>(6)</sup> Após a laminação de encruamento e recozimento final o tamanho de grão das amostras BF-0F e BF-5F foi maior do que 0,5 mm. Com grãos muito grandes a amostragem analisada na difração de raios-X é pequena, logo os resultados obtidos podem não ser representativos. As intensidades altas da amostra BF-0F (Figura 15) podem indicar que poucos grãos foram analisados. Porém é possível observar forte componente Goss para as amostras BF-0F e BF-5F. O aumento da componente Goss após o recozimento final de aços semiprocessados também foi observado por Kestens e cols.,<sup>(7)</sup> Cheong, Hilinski e Rollett,<sup>(8)</sup> Takashima, Kurosawa e Komatsubara<sup>(9)</sup> e Tschitschin e cols.<sup>(1)</sup>

### 3.3 Análise de Propriedades Magnéticas

Amostras longitudinais e transversais dos materiais após recozimento intermediário e após recozimento final foram analisadas em “Soken”. A Tabela 2 mostra os valores de  $B_{50}$  e Perdas medidos a 1,0T/60Hz e a 1,5T/60Hz. As linhas “L+T” representam a média entre os valores das amostras longitudinais e transversais para cada condição.

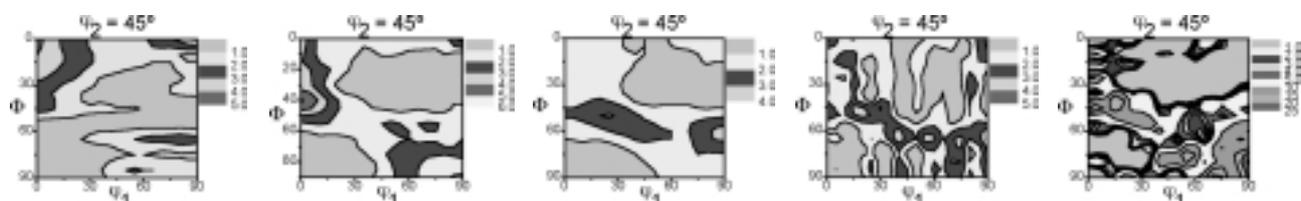


Figura 11. ODF da amostra BQ-0

Figura 12. ODF da amostra BF-0

Figura 13. ODF da amostra BF-0R

Figura 14. ODF da amostra BF-0E

Figura 15. ODF da amostra BF-0F

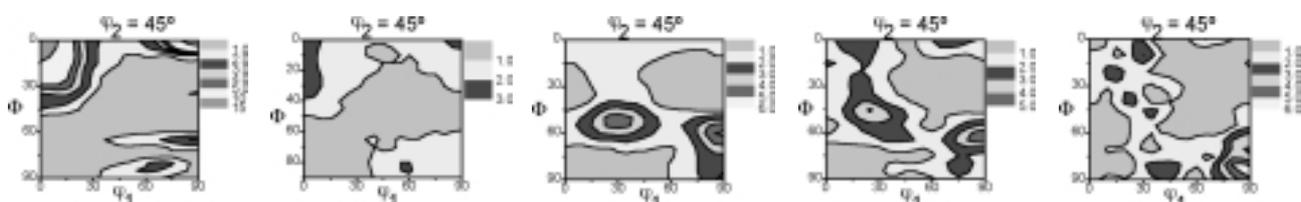


Figura 16. ODF da amostra BQ-5

Figura 17. ODF da amostra BF-5

Figura 18. ODF da amostra BF-5R

Figura 19. ODF da amostra BF-5E

Figura 20. ODF da amostra BF-5F

Tabela 2. Propriedades magnéticas

Amostra	Espessura (mm)	Tamanho de Grão ( $\mu\text{m}$ )	$B_{50}$	Perdas a 1.5T/60Hz	Perdas a 1.0T/60Hz
BF-0R-T	0.54		1.77	8.39	3.91
BF-0R-L	0.55	20	1.76	8.07	3.82
BF-0R-L + T			1.77	8.23	3.87
BF-5R-T	0.54		1.77	7.59	3.54
BF-5R-L	0.53	100	1.79	7.44	3.55
BF-5R-L + T			1.78	7.52	3.55
BF-0F-T	0.52		1.64	7.22	2.66
BF-0F-L	0.52	> 500	1.74	6.65	2.99
BF-0F-L + T			1.69	6.94	2.83
BF-5F-T	0.50		1.65	7.23	2.88
BF-5F-L	0.51	>500	1.80	6.17	2.76
BF-5F-L + T			1.73	6.70	2.82
Comercial-T	0.49		1.69	5.75	2.50
Comercial-L	0.49		1.72	5.24	2.31
Comercial-L + T			1.71	5.50	2.41

Os resultados mostram que as amostras BF-0R e BF-5R apresentam  $B_{50}$  semelhantes. Isso é compatível com a semelhança de textura dos materiais após o recozimento intermediário. As perdas magnéticas da amostra BF-5R são aproximadamente 9% inferiores (tanto na indução de 1,5T quanto a 1,0T). Isso pode ser explicado pelo maior tamanho de grão dessa amostra (100  $\mu\text{m}$ ) em relação à amostra BF-0R (40  $\mu\text{m}$ ).

O valor médio das perdas das amostras após recozimento final é maior que o valor de materiais comerciais, em quanto que os valores de  $B_{50}$  das amostras comerciais são ligeiramente inferiores. Para a comparação foi utilizada chapa de aço elétrico semi-processado comercial com mesma composição química, submetida a recozimento final de 760°C por duas horas em atmosfera de  $N_2$ ,  $H_2$  e  $H_2O$ .

Comparando-se as amostras transversais e longitudinais é possível observar se há anisotropia das propriedades magnéticas. A fonte mais comum de anisotropia nos aços elétricos está relacionada à ocorrência de componentes Goss na textura, resultando na presença de direção <100> paralela à direção de laminação. As amostras BF-5F (após recozimento final) apresentaram alta anisotropia, de acordo com os valores de  $B_{50}$  longitudinais e transversais (1,80T e 1,65T respectivamente). A anisotropia em relação às perdas magnéticas é maior a 1,5T. Em altas induções a textura tem grande importância em relação às perdas magnéticas. Esses resultados podem indicar que o aumento do tamanho de grão da BQ favorece a formação de componente de Goss após o recozimento final.

Para confirmar esse resultado será necessária a continuação do trabalho, modificando algumas etapas. Para melhorar a simulação do recozimento contínuo industrial é importante

modificar o tratamento térmico intermediário, reduzindo-se o tempo do tratamento. Para melhorar a simulação da laminação de acabamento industrial será necessário entender as variáveis da laminação de acabamento que afetam o tamanho de grão final da chapa. Se a simulação for bem sucedida, o tamanho de grão final das amostras ficará em torno de 150  $\mu\text{m}$  e a representatividade da análise de textura por difração de raios-X será melhor.

## 4 CONCLUSÕES

O procedimento utilizado para aumentar o tamanho de grão da BQ foi realizado com sucesso, proporcionando um aumento de 20  $\mu\text{m}$  para 200  $\mu\text{m}$ .

Maiores tamanhos de grão de BQ levaram a maiores tamanhos de grão nas amostras após laminação a frio e recozimento intermediário.

A laminação de encruamento seguida de recozimento final produziu amostras com tamanho de grão superior a 0,5 mm, não apresentando o mesmo comportamento de chapas de aço elétrico produzidas industrialmente, onde o tamanho de grão final fica em torno de 150  $\mu\text{m}$ .

Maior tamanho de grão da BQ não provocou maior intensidade de grãos Goss após o recozimento intermediário. O longo tempo do tratamento térmico provocou crescimento de grão, o que pode ter enfraquecido a componente Goss.

A anisotropia observada nas propriedades magnéticas pode indicar a presença de forte componente Goss nas amostras produzidas a partir de BQ com tamanho de grão de 200  $\mu\text{m}$  após o recozimento final.

## Agradecimentos

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas pela infra-estrutura e condições de trabalho oferecidas. À Companhia Siderúrgica Nacional pelo fornecimento de materiais e intercâmbio tecnológico. À ABM pela oportunidade de publicação.

## REFERÊNCIAS

- 1 TSCHITSCHIN, A.P.; PADILHA, A.F.; SCHÖN, C.G.; LANDGRAF, F.J.G.; GOLDSTEIN, H.; FALHEIROS, I.G.S.; LIMA, N.B. **Textura e relações de orientação**. 2. ed. Local de publicação : Editora, 2003. p. 212-239.
- 2 CAMPOS, M.F.; LANDGRAF, F.J.G.; TAKANOHASHI, R.; CHAGAS, F.C.; FALLEIROS, I.S.; FRONZAGLIA, G.C.; KAHN, H. Effect of the Hot band grain size and intermediate annealing on the deformation and recrystallization textures in low silicon electrical steels. **ISIJ International**, v. 44, n. 3, p. 591-597, Mês 2004.
- 3 KEH, A.S.; WEISSMANN, S. Deformation substructure in body-centered cubic metals. In: THOMAS, G.; WASHBURN, J. (Eds.) **Electron microscopy and strength of metals**. New York : Interscience, 1963. p. 231-300.

- 4 HARATANI, T.; HUTCHINSON, W.B.; DILLAMORE, I.L.; BATE, P. Contribution of shear banding to origin of goss texture in silicon iron. **Metal Science**, v. 18, n.5, p. 57-65, May 1984.
- 5 HUTCHINSON, W. B. Development and control of annealing textures in low-carbon steels. *International Metallurgy Reviews*, v. 29, n. 1, p. 25-42, Jan. 1984.
- 6 CUNHA, M.A.; PAOLINELLI, S.C.; CÉSAR, M.G.M.M. Avanços na produção de aço silício de grão não orientado na Acesita. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 56., 2001, Belo Horizonte. **Anais...** São Paulo : ABM, 2001. p.1592-1601.
- 7 KESTENS, L.; VAN HOUTTE, P; JONAS, J. J.; AERNOUDT, E. Orientation Selective recrystallization of nonoriented electrical steel. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 27A, n. 8, p.. 2347-2358, Aug. 1996
- 8 CHEONG, S.W.; HILINSKI, E.J.; ROLLETT, A.D. Secondary recrystallization. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v.34A, n.6, p. 1321-1327, June 2003.
- 9 TAKASHIMA, M.; KUROSAWA, M.; KOMATSUBARA, M. Texture development by two-stage cold rolling method in non-oriented electrical steel. In: JOINT INTERNATIONAL CONFERENCE ON RECRYSTALLIZATION AND GRAIN GROWTH, 1., 2001, Aachen, Germany. **Proceedings...** S.l. : s.ed., 2001, p. 477-482.

Recebido em: 09/02/2006

Aceito em: 19/10/2006

Proveniente de: CONAF – CONGRESSO DE FUNDIÇÃO, 12., 2005, São Paulo, SP. São Paulo: ABM, 2005.