

EFEITO DO TAMANHO DE GRÃO DA BOBINA A QUENTE NA EVOLUÇÃO DA TEXTURA DE AÇOS ELÉTRICOS SEMIPROCESSADOS¹

*Nicolau Apoena Castro²
Fernando Jose Gomes Landgraf³
Eduardo Cavalcante da Silva⁴
Taeko Yonamine⁵*

Resumo

O efeito do tamanho de grão da bobina a quente na evolução da textura de aços elétricos semiprocessados foi estudado no presente trabalho. Análises de textura por difração de raios-X e por EBSD indicam que grãos com orientação cubo na face e Goss nucleiam em bandas de deformação de grãos da fibra gama, e grãos cubo rodado apresentam menor tendência a recristalização durante o recozimento intermediário. Os resultados indicam que o aumento do tamanho de grão da BQ também é interessante no processo de fabricação de aços elétricos semiprocessados, proporcionando textura favorável para aplicação em motores elétricos.

Palavras-chave: Aço elétrico semiprocessado; Textura cristalográfica; Bandas de transição; Bandas de deformação; Bobina a quente.

THE EFFECT OF HOT BAND GRAIN SIZE ON SEMIPROCESSED ELECTRICAL STEEL SHEETS EVOLUTION TEXTURE

Abstract

The hot band grain size effect on the evolution texture of semiprocessed electrical steels was studied in this work. Texture analysis by X-Ray diffraction and EBSD showed that Goss and cube grains are nucleated in transition bands of gamma fiber grains, and non-recrystallized rotated cube grains were frequently found after intermediate annealing. The results show that the grain size increase is interesting to semiprocessed electrical steels, due to favorable texture increase for electrical motors application.

Key words: Electrical steel; Crystallographic texture; Transition band; Deformation band; Hot band.

¹ *Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil*

² *Dr., IPT - Laboratório de Metalurgia do Pó e Materiais Cerâmicos.*

³ *Dr., EPUSP - Departamento de Metalurgia e Materiais*

⁴ *Eng., IPT - Laboratório de Metalurgia do Pó e Materiais Cerâmicos.*

⁵ *Dra., INMETRO/DIMCI/DIMAT - Divisão de Metrologia de Materiais*

1 INTRODUÇÃO

Existem dois tipos de aço elétrico: os aços elétricos de grão orientado e os de grão não orientado. Os aços elétricos de grão orientado (GO) são utilizados para a fabricação de núcleo de transformadores elétricos. Por apresentarem forte orientação (110)[001], as propriedades magnéticas são máximas quando o campo é aplicado sempre na direção de laminação. Os transformadores são projetados de forma a obedecer a esse critério. Os aços elétricos de grão não orientado (GNO), opostamente ao que o nome sugere, não devem apresentar orientação cristalográfica aleatória para otimização das propriedades magnéticas. São utilizados para fabricação de núcleo de motores elétricos, que por apresentarem campo magnético rotativo, exigem uma textura (100)[0vw]. O processo de fabricação dos aços elétricos GNO não possibilita alcançar a textura ideal. Ainda não foi desenvolvido um processo que permita a obtenção de textura ideal em chapas de aço com espessura abaixo de 0,6 mm. Aços elétricos GNO são subdivididos em duas subcategorias: os aços elétricos totalmente processados e os aços elétricos semiprocessados. O primeiro está pronto para ser estampado na forma de rotores e estatores de motores, apresentando boas propriedades magnéticas sem a necessidade de tratamento térmico posterior. Os aços semiprocessados exigem tratamento térmico ou termoquímico após a estampagem para otimização das propriedades magnéticas. Grandes transformações microestruturais ocorrerão nessa etapa de recozimento.

Os processos de fabricação dos aços elétricos de grão não orientado serão apresentados sucintamente. A Figura 1 apresenta uma representação esquemática do processo de fabricação dos aços elétricos totalmente processados.

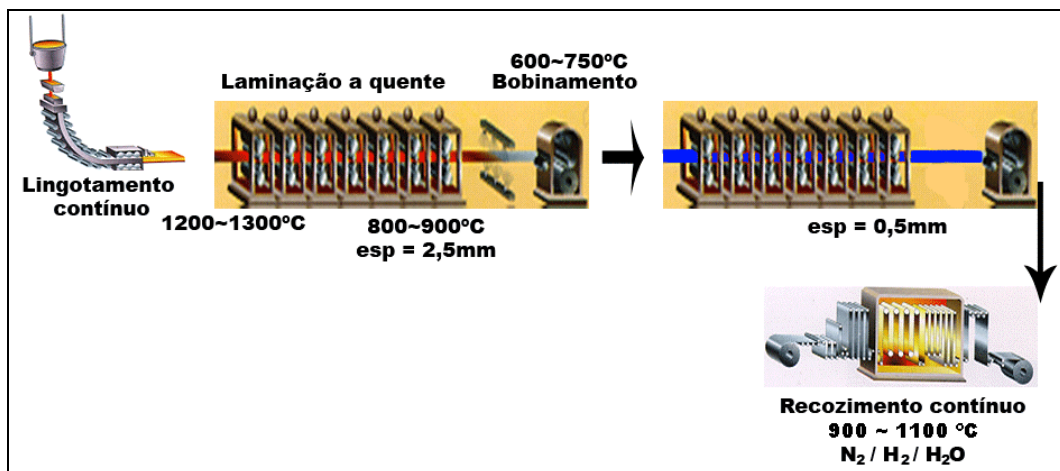
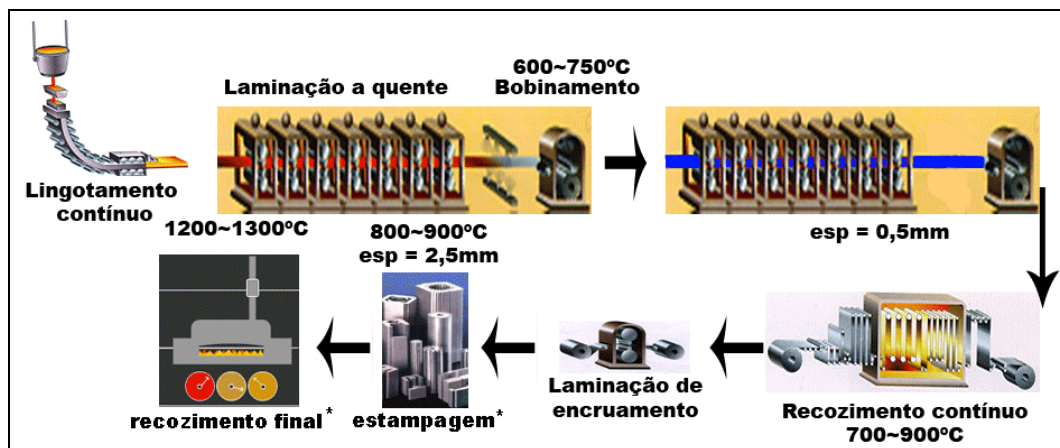


Figura 1: representação esquemática do processo de fabricação de aço elétrico GNO totalmente processado

Partindo-se de lingotes de aço ao silício, o material passa sucessivamente por laminação a quente, laminação a frio e recozimento contínuo, etapa em que ocorre recristalização e crescimento de grão. Em seguida, o material é bobinado, estando pronto para ser estampado e utilizado para montagem dos núcleos de motores.

O processo de fabricação dos aços elétricos semiprocessados não exige recozimento descarbonetante e recozimento em caixa, mas uma etapa de laminação de encruamento é necessária. Após esta etapa, o material está pronto para ser vendido, porém exige do fabricante de motores um recozimento descarbonetante após a estampagem das chapas. Nesse recozimento haverá aumento do tamanho

de grão induzido por deformação (aplicada na laminação de encruamento) e redução do teor de carbono, proporcionando melhores propriedades magnéticas. A Figura 2 apresenta o fluxograma do processo.



*etapas realizadas no fabricante de motores

Figura 2: representação esquemática do processo de fabricação de aço elétrico GNO semiprocessado

O aumento do tamanho de grão da bobina a quente (BQ) apresenta considerável melhoria da textura final de aços elétricos totalmente processados, utilizados para fabricação de núcleos de motores elétricos. Haratani e Hutchinson^[1] observaram que a laminação a frio de bobina quente (BQ) com grande tamanho de grão favorece a nucleação de grãos com orientação Goss ((110)[001]) durante a recristalização. Pouco se fala sobre o efeito do tamanho de grão da BQ no processo de fabricação de aços elétricos semiprocessados, assunto que será foco deste trabalho.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizadas como material de partida três bobinas a quente com diferentes composições químicas. As composições das BQs utilizadas estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: composição química das BQs

| Elemento | BQ1 (% massa) | BQ2 (% massa) | BQ3 (% massa) |
|----------|---------------|---------------|---------------|
| Si | 0,08 | 0,3 | 0,24 |
| Al | < 0,03 | 0,2 | 0,03 |
| C | 0,06 | 0,004 | 0,003 |
| O | 0,002 | 0,002 | 0,002 |
| N | 0,003 | 0,003 | 0,002 |
| S | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| P | 0,015 | 0,09 | 0,01 |
| Mn | 0,43 | 0,63 | 0,18 |

A BQ1 apresenta baixos teores de Si e Al e maior teor de carbono (600 ppm) em relação à BQ2 e BQ3. Devido ao elevado teor de carbono, a BQ1 foi submetida a recozimento em atmosfera descarbonetante, que causou pronunciado aumento do tamanho de grão. A BQ2 e BQ3 foi submetida à laminação de encruamento e recozimento sob vácuo, procedimento que também provocou grande aumento de tamanho de grão. As bobinas a quente (antes e após recozimentos) foram

submetidas à laminação a frio, recozimento intermediário, laminação de encruamento e recozimento final, simulando o processo de fabricação de aços elétricos semiprocessados. Foram realizadas análises microestruturais e de textura após cada etapa de processamento. As análises microestruturais foram realizadas em microscópio óptico e as análises de textura foram feitas por difração de raios-X e EBSD. Utilizou-se difratômetro Shimadzu DRX-6000, equipado com goniômetro de textura e sistema de lentes policapilares, utilizando-se fonte de Co. As ODF (funções distribuição de orientação) foram calculadas a partir de três figuras de pólo incompletas: (110), (200) e (211). Para análise por EBSD, foi utilizado microscópio eletrônico de varredura Jeol 6300, com câmera de EBSD da Oxford.

A nomenclatura, bem como a descrição das amostras produzidas encontra-se na Tabela 2.

Tabela 2: identificação e descrição das amostras produzidas

| BQ com tamanho de grão pequeno | | BQ com tamanho de grão grande | |
|--------------------------------|---|-------------------------------|--|
| Identificação | Descrição | Identificação | Descrição |
| BQ1 | Bobina a quente 1 (600 ppm C) | BQ1R | BQ1 + recozimento descarbonetante (760°C por 4h) |
| LF1 | BQ1 + laminação a frio ($\epsilon = 1,2$) | LF1R | BQ1R + laminação a frio ($\epsilon = 1,2$) |
| RI1 | LF1 + recozimento intermediário (700°C por 15 minutos) | RI1R | LF1R + recozimento intermediário (700°C por 15 minutos) |
| RF1 | RI1 + laminação de encruamento ($\epsilon=0,10$) + recozimento final descarbonetante (760°C por 2h) | RF1R | RI1R + laminação de encruamento ($\epsilon=0,10$) + recozimento final sob vácuo (760°C por 2h) |
| BQ2 | Bobina a quente 2 (40 ppm C, 0,3% Si e 0,2% Al) | BQ2R | BQ2 + laminação de encruamento ($\epsilon=0,05$) recozimento sob vácuo (760°C por 32h) |
| LF2 | BQ2 + laminação a frio ($\epsilon = 1,6$) | LF2R | BQ2R + laminação a frio ($\epsilon = 1,6$) |
| RI2 | LF2 + recozimento intermediário (800°C por 5 minutos) | RI2R | LF2R + recozimento intermediário (800°C por 5 minutos) |
| RF2 | RI2 + laminação de encruamento ($\epsilon=0,10$) + recozimento final sob vácuo (760°C por 2h) | RF2R | RI2R + laminação de encruamento ($\epsilon=0,10$) + recozimento final sob vácuo (760°C por 2h) |
| BQ3 | Bobina a quente 3 (30 ppm C, 0,24% Si) | BQ3R | BQ3 + laminação de encruamento ($\epsilon=0,06$) recozimento sob vácuo (760°C por 32h) |
| LF3 | BQ3 + laminação a frio ($\epsilon = 1,6$) | LF3R | BQ3R + laminação a frio ($\epsilon = 1,6$) |
| RI3 | LF3 + recozimento intermediário (800°C por 5 minutos) | RI3R | LF3R + recozimento intermediário (800°C por 5 minutos) |
| RF3 | RI3 + laminação de encruamento ($\epsilon=0,10$) + recozimento final sob vácuo (760°C por 2h) | RF3R | RI3R + laminação de encruamento ($\epsilon=0,10$) + recozimento final sob vácuo (760°C por 2h) |

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Imagens de microscopia óptica das amostras obtidas estão apresentadas nas Figuras 3 e 4.

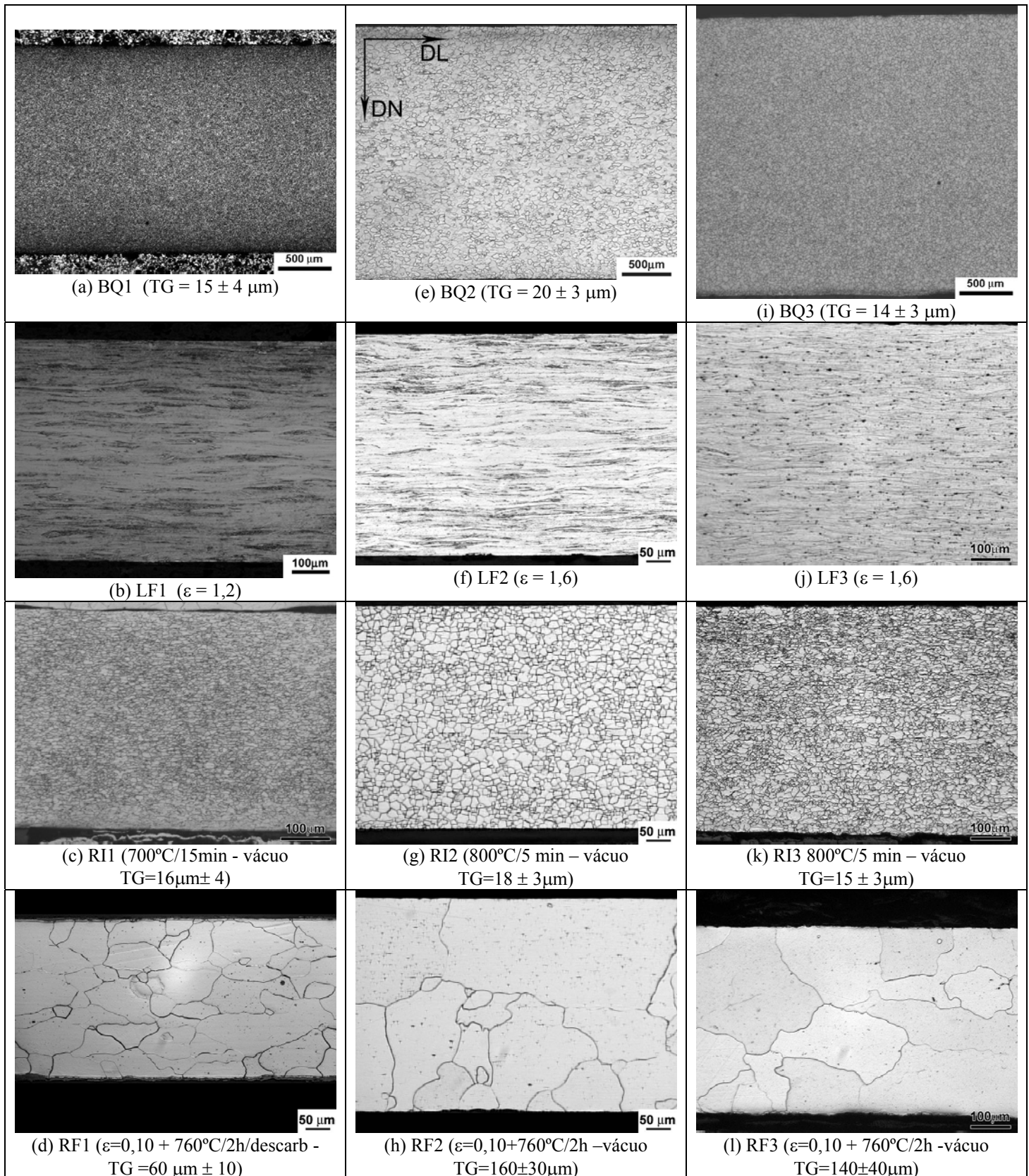


Figura 3: imagens de microscopia óptica das amostras produzidas a partir das BQs com tamanho de grão pequeno.

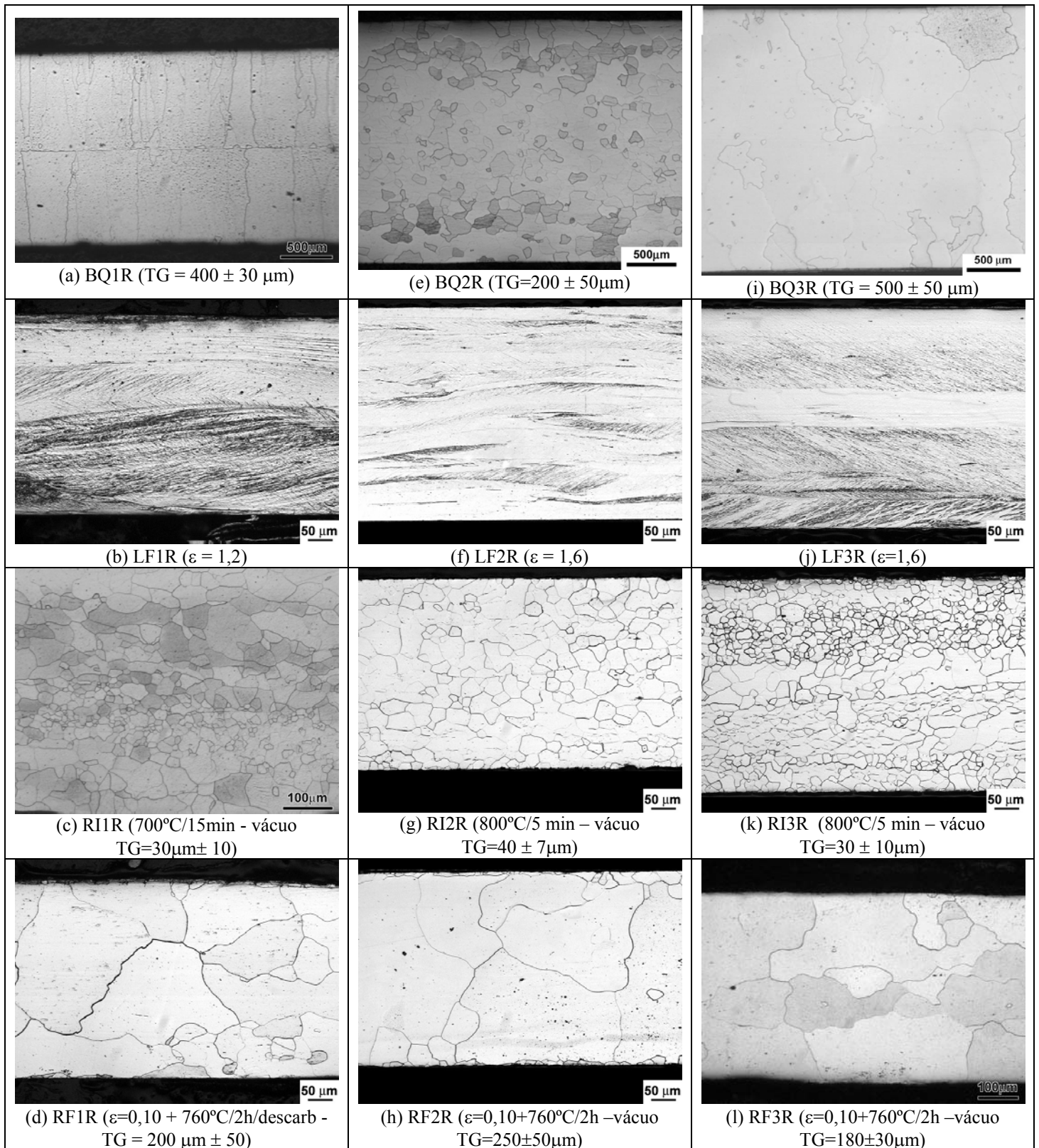


Figura 4: imagens de microscopia óptica das amostras produzidas a partir das BQs com tamanho de grão grande.

As Bqs como recebidas apresentam tamanho de grão pequeno (Figuras 3a, 3e e 3i), da ordem de 20 microns. Após laminação a frio e recozimento intermediário (Figuras 3c, 3g e 3k), as chapas também apresentaram tamanho de grão recristalizado de aproximadamente $20 \mu\text{m}$. As amostras submetidas à laminação de

encruamento e recozimento final (Figuras 3d, 3h e 3l) apresentaram aumento pronunciado de tamanho de grão, comportamento já esperado em relação à amostras submetidas a pequenas deformações e recozimentos, como observado durante o recozimento final de aços elétricos semiprocessados.

Partindo-se de BQs com tamanho de grão grande, entre 200 microns e 500 microns (Figuras 4a, 4e e 4i), observou-se alta densidade de bandas de deformação nas amostras após laminação a frio, como se observa nas Figuras 4b, 4f e 4j. Após recozimento intermediário, obteve-se tamanho de grão recristalizado em torno de 30 μm , maiores do que as amostras obtidas a partir das BQs como recebidas, após recozimento intermediário. Tal fato pode ser explicado pela relação entre densidade de discordâncias e tamanho de grão,^[2] apresentado na equação 1. Dada uma deformação real, quanto maior o tamanho de grão, menor será a densidade de discordâncias, gerando tamanhos de grão recristalizados maiores. Observou-se também grande heterogeneidade de tamanhos de grão após recozimento intermediário, provavelmente relacionada ao gradiente de encruamento entre grãos, após laminação a frio. Regiões com maior encruamento devem gerar grãos recristalizados menores. Este gradiente deve estar relacionado à orientação cristalográfica, podendo-se explicar pelo fator de Taylor.^[3] Orientações com alto fator de Taylor devem apresentar maior encruamento e, conseqüentemente, menores tamanhos de grão recristalizados.

$$\rho = \frac{\varepsilon}{k_1 b} \cdot \frac{1}{d^n} \quad \text{equação 1 [2]}$$

onde ε é a deformação real,
 b é o módulo do vetor de Burgers,
 d é o tamanho de grão,
 k_1 e n são constantes.

Após laminação de encruamento e recozimento final, observou-se novamente aumento pronunciado do tamanho de grão, como se observa nas Figuras 4d, 4h e 4l.

As análises de textura por difração de raios-X foram feitas em seções paralelas à superfície, DL – DT (Direção de laminação – Direção transversal), próximo à meia espessura das chapas. Os resultados estão apresentados na Figura 5.

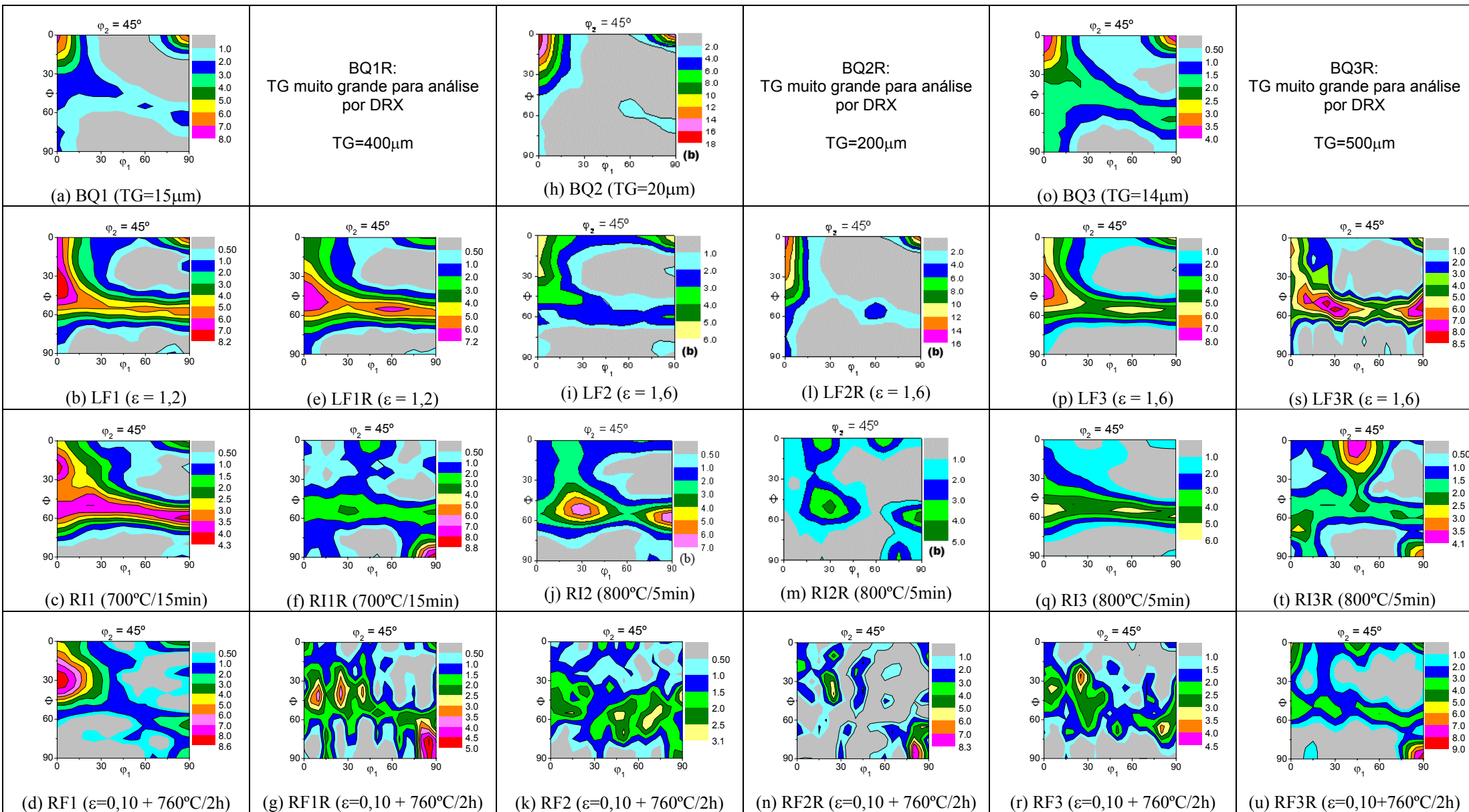


Figura 5: ODF das amostras produzidas. Análise de seções DL-DT (paralelas à superfície) das amostras, lixadas e polidas até meia espessura.

Observa-se que todas as bobinas a quente como recebidas (Figuras 5a, 5h e 5o) apresentam máximas intensidades em cubo rodado ($\{100\}\langle 011\rangle$), provavelmente relacionada à transformação de austenita para ferrita durante a laminação a quente.^[4] A BQ2 apresenta orientação cubo rodado com intensidade muito elevada (18 vezes o aleatório), enquanto que para a BQ1 e BQ3 foram encontradas intensidades relativas de 8 e 4, respectivamente. Não foi possível analisar as texturas das BQs após recozimento, pois o elevado tamanho de grão dos materiais não permite a obtenção de ODF confiáveis por difração de raios-X.

A laminação a frio proporcionou aumento de fibra alfa ($\langle 110\rangle//DL$) e fibra gama ($\langle 111\rangle//DN$), no entanto, as amostras obtidas a partir da BQ2 e BQ2R apresentaram fibra gama menos intensa e cubo rodado predominante (Figuras 5i e 5l). Tal fato deve estar relacionado à forte orientação cubo rodado dessas bobinas a quente. Por ser uma orientação estável para deformação por laminação, grãos com orientação cubo rodado deverão sofrer pouca rotação e fragmentação, levando a menores intensidades de fibra gama após laminação a frio.

Após recozimento intermediário, as amostras obtidas a partir das BQs com pequeno tamanho de grão apresentaram aumento de fibra gama, principalmente de $\{111\}\langle 112\rangle$, e redução de cubo rodado (Figuras 5c, 5j e 5q). As amostras RI1R e RI3R, oriundas de BQs com grãos grandes, apresentaram pronunciadas componentes Goss ($\{110\}\langle 001\rangle$) e cubo na face ($\{100\}\langle 001\rangle$), provavelmente relacionadas ao início de recristalização em bandas de transição de grãos de fibra gama^[1,5,6] e fibra gama menos intensa, devido à redução de nucleação em contornos de grão. A BQ2R (Figura 5m) apresentou menores intensidades de cubo na face e Goss, apesar de ter sido obtida a partir de BQ com elevado tamanho de grão. Como grãos recristalizados com essas orientações provavelmente nucleiam em bandas de transição de grãos de fibra gama, é possível que altas intensidades de cubo rodado após laminação a frio sejam responsáveis pela redução de Goss e cubo na face após recozimento intermediário. Este comportamento indica que somente o aumento do tamanho de grão da BQ não é suficiente para a obtenção de elevadas intensidades de orientação Goss após recozimento intermediário. A textura da BQ também é importante para a determinação da textura de deformação e recristalização de aços elétricos de grão não orientado.

As amostras submetidas à laminação de encruamento e recozimento final apresentaram redução de fibra gama e aumento de componente Goss, principalmente nas amostras obtidas a partir de bobinas a quente com elevado tamanho de grão, indicando que o aumento do tamanho de grão da BQ é interessante também para a produção de aços elétricos semiprocessados, levando à orientações favoráveis para a aplicação em núcleo de motores elétricos.

A seguir serão apresentadas análises de EBSD realizadas em seções longitudinais (DL-DN) de amostras laminadas a frio, submetidas a recozimentos interrompidos.

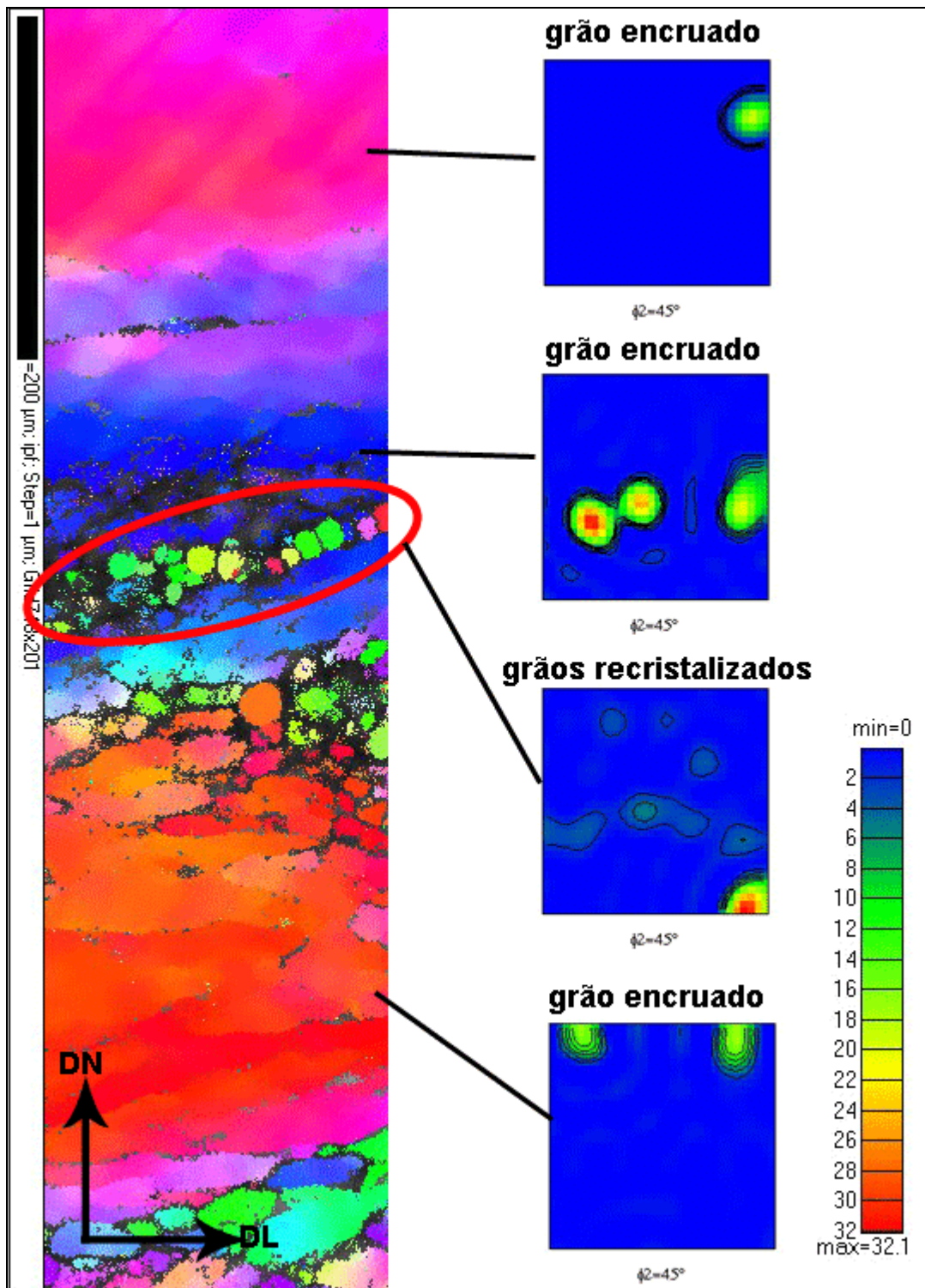


Figura 6: Mapa de figura de pólo inversa e ODF de regiões analisadas por EBSD da amostra LF1R após recozimento a 700°C por 1 minuto.

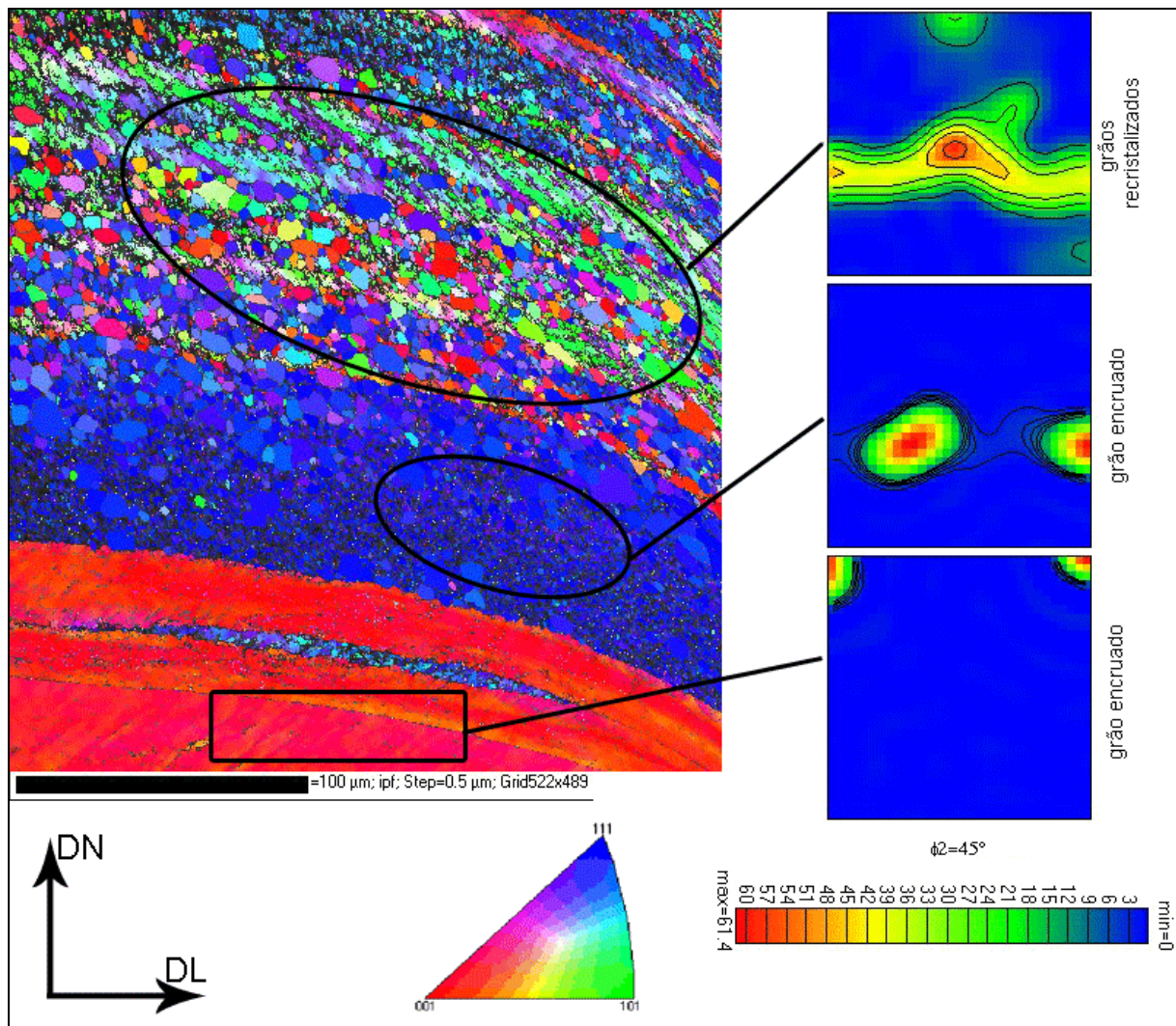


Figura 7: Mapa de figura de pólo inversa e ODF de regiões analisadas por EBSD da amostra LF1R após recozimento a 800°C por 1 minuto.

As análises de textura por EBSD mostram grãos cubo rodado (grãos vermelhos) não recristalizados, sem a presença de núcleos em bandas de transição. A não-recristalização desses grãos pode estar relacionada ao baixo fator de Taylor da orientação cubo rodado, que apresenta baixo nível de encruamento durante a laminação. As Figuras 6 e 7 apresentam regiões com nucleação de grãos Goss e cubo na face (grãos verdes e vermelhos, respectivamente), provavelmente em bandas de transição de grãos com orientação $\{111\}\langle 112\rangle$. As orientações podem ser verificadas nas ODF calculadas para as seleções de grãos recristalizados e grãos encruados, conforme apresentado nas figuras.

Estes resultados fortalecem a hipótese de que grãos Goss e cubo na face nucleiam em bandas de transição de grãos de fibra gama. A observação de diversas regiões não recristalizadas com orientação cubo rodado é coerente com o baixo fator de Taylor, indicando que essas regiões apresentam menor encruamento e menor potencial termodinâmico para a recristalização primária.

4 CONCLUSÕES

- O aumento do tamanho de grão da bobina a quente proporcionou altas intensidades de orientações $\{110\}\langle 001\rangle$ (Goss) e $\{100\}\langle 001\rangle$ (cubo na face), após recozimento intermediário, principalmente para as BQs com orientação $\{100\}\langle 011\rangle$ (cubo rodado) menos intensa;
- O aumento do tamanho de grão da BQ mostrou-se interessante também para a produção de aços elétricos semiprocessados, proporcionando aumento de intensidade de componentes de textura favoráveis para aplicação em motores elétricos;
- As análises por EBSD indicam que grãos com orientação cubo na face e Goss nucleiam em bandas de transição de grãos de fibra gama ($\langle 111\rangle//DN$) e que grãos com orientação cubo rodado são menos susceptíveis a recristalização.

REFERENCIAS

- 1 HARATANI, T, HUTCHINSON, W.B., DILLAMORE, I.L. BATE, P. Contribution Of Shear Banding To Origin Of Goss Texture In Silicon Iron. Metal Science 18, P. 57-65, 1984
- 2 CONRAD, H.; CHRIST, B. L. Changes in internal energy associated with recovery and recrystallization. Himmel (ed.). Recovery and Recrystallization in Metals. Interscience, p. 24-25, Londres, 1976.
- 3 GILL SEVILLANO, J.; VAN HOUTTE, P.; AERNOUDT, E. Large strain work hardening and textures. Prog. Mat. Sci., v. 25, p. 69-412, 1980.
- 4 RAY, R. K.; JONAS, J. J. Transformation textures in steels. Int. Mat. Rev., v. 35, n. 1, p. 1-36, 1990
- 5 CUNHA, M. A.; PAOLINELLI, S. C.; Materials Science Fórum Vols 408-412 (2002) pp. 779-784
- 6 CASTRO, N. A. Controle da Textura e da Microestrutura Durante o Processo de Fabricação de Aços Elétricos Semiprocessados. São Paulo: EPUSP, 2007. 145p. Tese (doutorado). Pós-graduação em engenharia de materiais, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008