

RECRISTALIZAÇÃO PRIMÁRIA DE UM AÇO 3% Si SOB ALTA TENSÃO DE TRAÇÃO¹

Maria das Graças M. M. César²
Sebastião da Costa Paolinelli²
André Barros Cota³

Resumo

Foi investigado o efeito da tensão de tração durante o processo de descarbonetação de um aço 3% Si sobre a estrutura primária, obtida após esta etapa e sobre a estrutura secundária obtida após recozimento final. A tira foi estirada até 17% com uma tensão correspondente a 25 MPa. A deformação plástica da tira durante esta etapa aumentou o tamanho de grão primário e mudou a textura, principalmente a fibra γ . Após o recozimento final, os grãos secundários aumentaram de tamanho e ocorreu um acréscimo significativo da indução magnética a 800 A/m em relação ao material processado com baixa tensão de tração.

Palavras-chave: Aço silício de grão orientado; Recristalização primária; Textura.

PRIMARY RECRYSTALLIZATION UNDER HIGH TENSION OF 3% Si STEEL

Abstract

It was investigated the effect of the tension during the process of decarburization on the structures of 3% Si steel after primary and secondary recrystallization. The strip was stretched up to 17% with 25 MPa. The plastic deformation of the strip increases primary grain size and changes texture mainly γ fiber. After final annealing, the secondary grain size and magnetic induction increase as a consequence of the elongation increasing in the decarburization.

Key words: Grain oriented silicon steel; Primary recrystallization; Texture.

¹ Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Pesquisador Arcelor Mittal Inox Brasil, M.Sc., D.Sc

³ Membro da ABM, Professor, M.Sc., D.Sc., Redemat/UFOP, Ouro Preto/MG.

1 INTRODUÇÃO

Os aços silício de grão orientado são utilizados na fabricação de núcleos de transformadores. A exigência para esta aplicação é que o aço seja facilmente magnetizável e apresente baixa perda magnética por histerese e por correntes parasitas. As duas primeiras propriedades são garantidas pela composição, pureza e orientação cristalográfica do aço. A magnetização ocorre mais facilmente na direção $\langle 100 \rangle$ e todo o processo de fabricação é feito de tal maneira a garantir que se forme uma orientação com a direção $\langle 100 \rangle$ paralela à direção de laminação. Nos processos industriais, a textura desenvolvida é denominada textura de Goss $\{110\}\langle 001 \rangle$. A forte textura de Goss é desenvolvida por crescimento anormal dos grãos, ou recristalização secundária, a partir de uma matriz recristalizada, denominada matriz primária, onde o crescimento normal é inibido por uma dispersão de partículas de precipitado.⁽¹⁾

Vários estudos tem sido realizados para explicar os mecanismos da recristalização secundária no aço silício de grão orientado, mas ainda não há um claro entendimento dos fatores que levam ao crescimento somente dos grãos de Goss. Atualmente, um dos modelos mais aceitos é do crescimento seletivo CSL (coincidence site lattice boundaries - contornos com rede de pontos coincidentes), que se baseia no fato de que os grãos com orientação de Goss têm maior probabilidade de formar contornos especiais com certas orientações da matriz primária. O crescimento dos grãos de Goss nos aços silício de grão orientado produzidos com dois estágios de laminação a frio tem sido atribuído aos contornos CSL $\Sigma 5$.⁽¹⁻³⁾

No processo convencional de produção dos aços silício de grão orientado, após a laminação para a espessura final, o material é submetido a um recozimento no qual ocorrem descarbonetação e recristalização primária da tira deformada. Este tratamento é realizado em fornos elétricos, sob condições controladas de atmosfera e antecede o recozimento final, onde ocorrem a formação da textura de Goss e a purificação (dessulfuração e desnitreção) do aço.

O recozimento e descarbonetação da tira de aço deformada são feitos em linhas contínuas sob uma tração da ordem de 7 MPa 10 MPa e nestas condições, a tira de aço sofre uma deformação plástica. Este trabalho visa estudar o efeito da tensão de tração aplicada a tiras de um aço 3%Si sobre a qualidade dimensional e a microestrutura primária do material, durante o processo de recristalização e descarbonetação, e, correlacionar as estruturas primária e secundária.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Amostras 3%Si e 0,04%C laminadas para a espessura 0,27 mm foram cortadas nas dimensões 600 x 50 mm, soldadas em uma tira líder de 100 mm de largura e descarbonetadas nas temperaturas de 860°C-880°C com tempo de permanência (encharque) de 60 s em uma atmosfera com a $p_{H_2O}/p_{H_2} = 0,30$, sob carga de tração variável na faixa de 50 N-350 N. As amostras foram marcadas com um gabarito de 472 mm antes e após a etapa de descarbonetação e o estiramento foi medido com um paquímetro digital.

As amostras descarbonetadas foram cortadas nas dimensões 30 x 100 mm, revestidas com uma lama de magnésia com 12% fosfatos e submetidas a um recozimento final em atmosfera de H_2 com 15 horas de encharque a 1.200°C.

Foi acompanhada a evolução da estrutura primária por metalografia ótica e EBSD.^(3,4) O tamanho de grão primário via EBSD foi caracterizado a partir de 700 medidas a 800 medidas de interceptos. A estrutura após recozimento final foi caracterizada metalograficamente. As propriedades magnéticas foram determinadas pelo teste chapa única ao longo da direção de laminação em amostras de 100 x 30 mm.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 mostra o estiramento do material em função da tensão de tração utilizada na decarbonetação. Com a tensão de tração entre 7 Mpa e 25 MPa, o estiramento variou de 0,4% a 17%. A Figura 2 mostra que o estiramento ocorreu principalmente às custas da espessura e que os resultados de espessura apresentaram maior dispersão nas amostras com estiramento maior que 2%.

A Figura 3 mostra o tamanho médio de grão primário em função do estiramento considerando contornos de grãos acima de 5° e contornos de alto ângulo ($\geq 15^\circ$). Pode se observar que o estiramento aumentou o tamanho médio do grão primário e que o mesmo tende a estabilizar em torno de 10 μm e 11 μm , para contornos com desvios de 5° e 15°, respectivamente. A Figura 4 mostra a matriz primária obtida com 0,4% e 16,8% de estiramento.

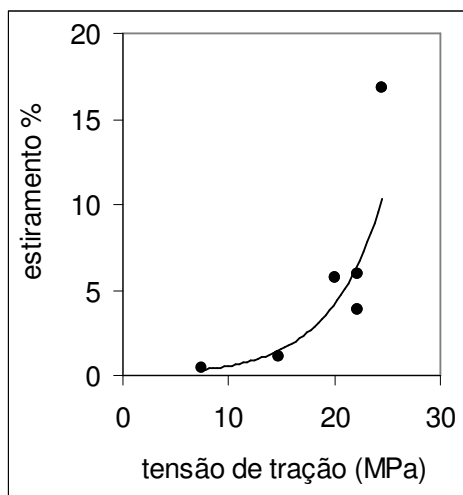


Figura 1 – Estiramento em função da tração

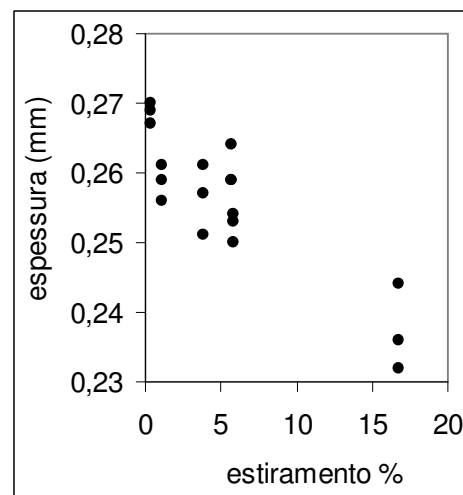


Figura 2 - Espessura x estiramento

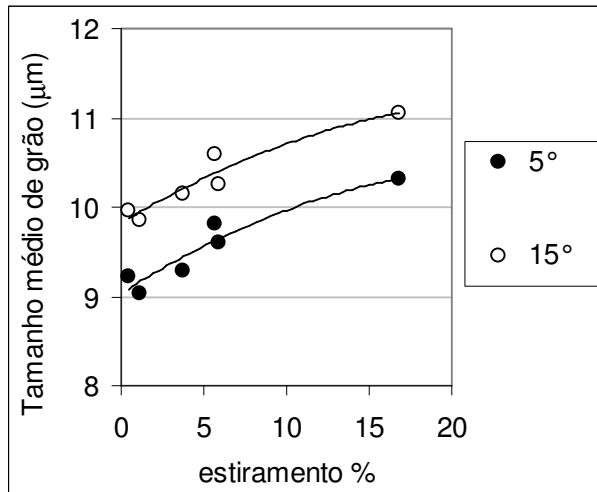
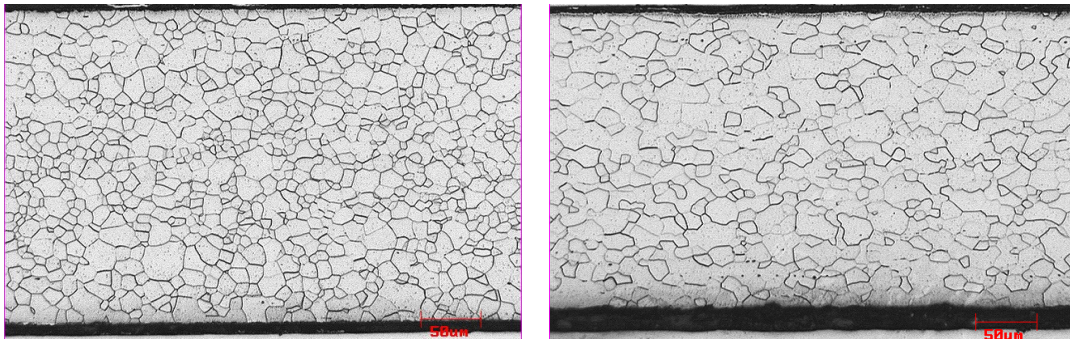


Figura 3 – Tamanho médio de grão como uma função da % de estiramento



0,4% estiramento

16,8% estiramento

Figura 4 – Micrografias da matriz primária ao longo da espessura da amostra

A Figura 5 mostra a distribuição de tamanho considerando o valor médio de todos os interceptos para contornos com desvios de orientação acima de 5° . Com o estiramento crescente, os grãos cresceram de maneira uniforme em um processo contínuo. As distribuições foram monomodais, típicas de um crescimento de grão normal.⁽⁶⁾

A força motriz para o crescimento de grão é a redução da energia do contorno com o crescimento de grão. O decréscimo de energia com o crescimento depende do raio do grão que está crescendo, do raio médio do grão da matriz e da energia do contorno de grão. Considerando o crescimento de grão de maneira tridimensional, o decréscimo de energia com o crescimento deve ocorrer para grãos com vantagem de tamanho sobre seus vizinhos maior que $4/3$.⁽⁷⁾ A amostra com o estiramento mais baixo apresentou cerca de 20% dos grãos com vantagem de tamanho e as demais apresentaram entre 22% e 25%. Aparentemente, o estiramento não provocou o crescimento de grãos com vantagem de tamanho.

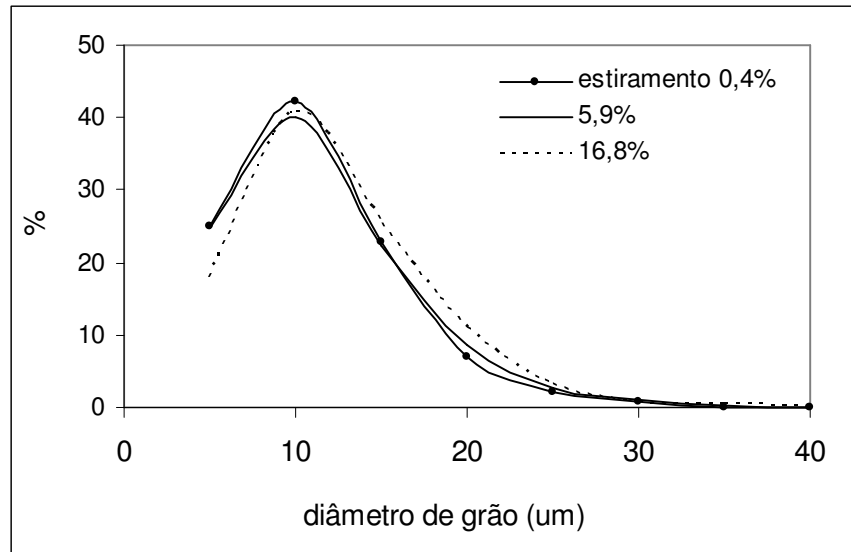


Figura 5 – Distribuição de tamanho dos grãos primários para amostras com estiramento variável.

A determinação do tamanho de grão via EBSD permitiu identificar os interceptos da direção longitudinal e ao longo da espessura. A Figura 6 mostra que os grãos primários apresentaram maior dimensão na direção longitudinal e que o estiramento provocou um crescimento maior na direção longitudinal do que ao longo da espessura. Os valores máximos dos interceptos na direção longitudinal oscilaram entre 24 μm e 40 μm , independente do estiramento.

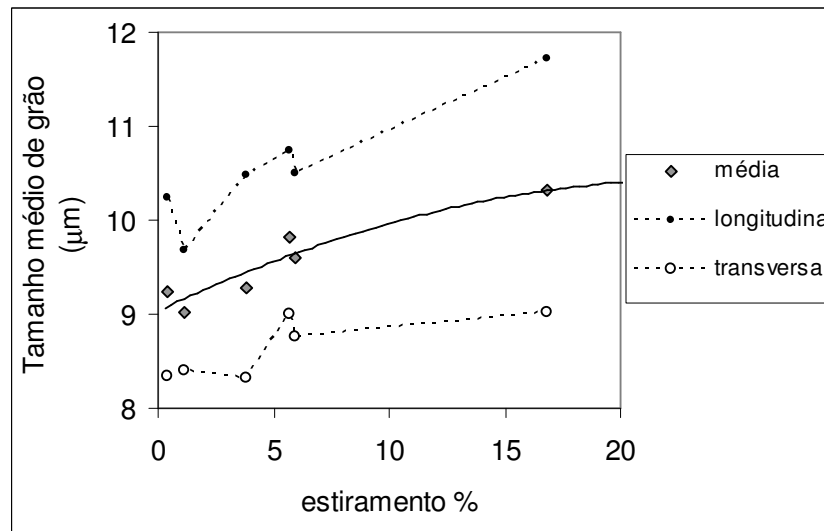


Figura 6 – Tamanho médio de grão na direção longitudinal e ao longo da espessura.

Foi feita interrupção do recozimento contínuo de algumas amostras para determinar em que etapa do ciclo de tratamento térmico estariam ocorrendo a recristalização primária e o estiramento. Amostras retiradas do forno antes da zona de encharque permitiram observar que o material não estira durante a etapa de aquecimento e que a 700°C a microestrutura está totalmente recristalizada. Considerando esta observação, o estiramento das amostras ocorreu durante o encharque a 860°C-880°C no material totalmente recristalizado.

Utilizando recursos de EBSD foram calculados os desvios de orientação entre 2° e 5°, 5° e 15° e maiores que 15° na estrutura primária. Pode se observar na Figura 7 uma tendência de aumento de contornos de baixo ângulo com o estiramento, isto é, o material tende a acumular discordâncias. A análise de imagem considerando os desvios de orientação entre 2° e 5° mostrou que os contornos de baixo ângulo ocorrem próximos aos contornos de grão de alto ângulo e esta localização sugere que os mesmos se formam para permitir a continuidade do material durante a deformação plástica. Trabalhos já realizados mostraram que no material policristalino plasticamente deformado se formam discordâncias na periferia dos contornos de grão para evitar falhas e vazios.⁽⁸⁾

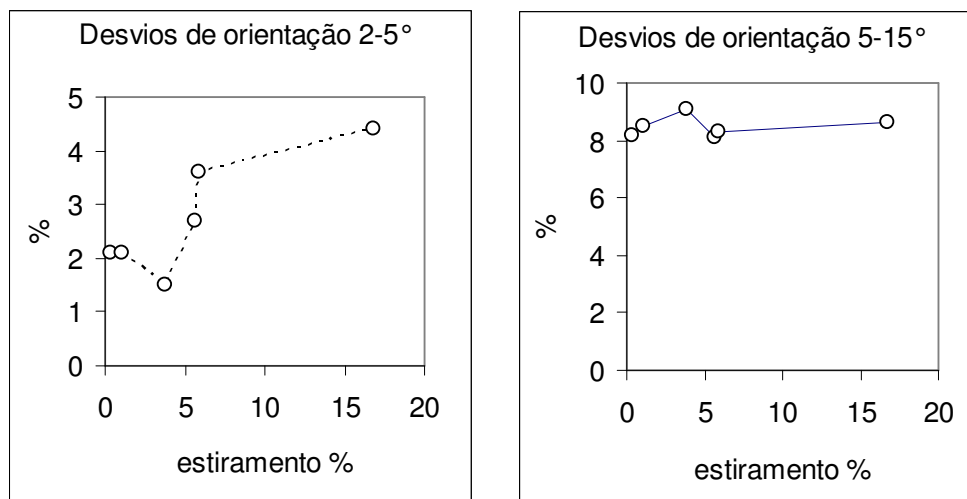


Figura 7 – Fração volumétrica dos desvios de orientação (a) entre 2° e 5° e (b) entre 5° e 15°

A Figura 8a apresenta a variação das frações volumétricas das fibras α , γ e η em função do estiramento. Com o estiramento crescente, a fração de fibra γ decresce enquanto as fibras α e η têm um comportamento variável. A Figura 8b mostra que na fibra γ , a orientação $\{111\} \langle 11\bar{2} \rangle$ decresce sistematicamente com o estiramento enquanto $\{111\} \langle 1\bar{1}0 \rangle$ decresce até cerca de 4% de estiramento e em seguida aumenta atingindo valores de intensidade maiores que $\{111\} \langle 11\bar{2} \rangle$.

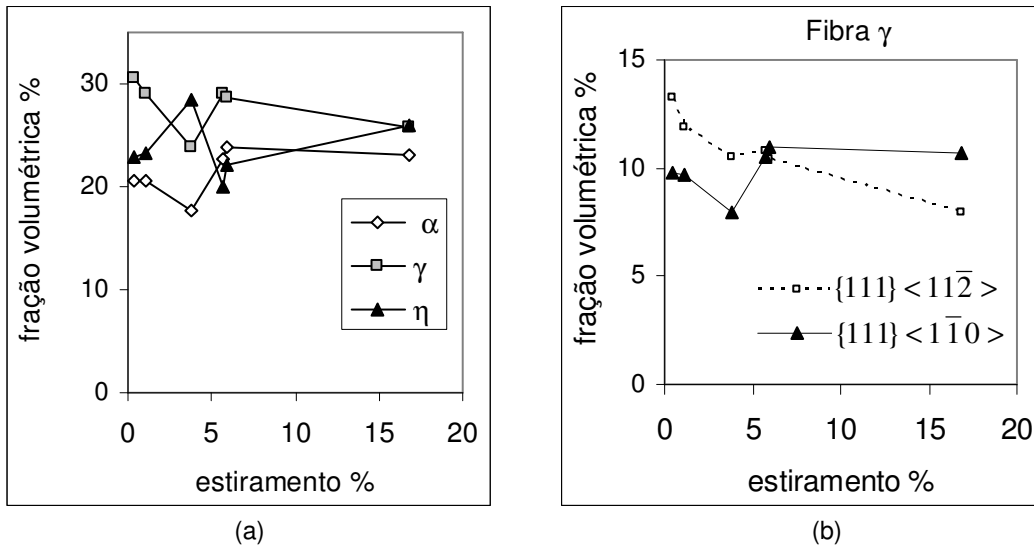


Figura 8 – Fibras α , γ e η e principais orientações na fibra γ versus estiramento.

Trabalhos já realizados mostraram que os grãos de Goss até 25° são os que apresentam maior probabilidade de fazer contornos especiais CSL $\Sigma 5$ com os grãos da matriz primária típica sendo que a probabilidade é maior para grãos mais próximos do Goss ideal.⁽¹⁻²⁾

A Figura 9 mostra as frações volumétricas das orientações com desvios da orientação de Goss até 25° em função do estiramento. Com cerca de 4% de estiramento crescem grãos de Goss mais bem orientados e a medida que o estiramento aumenta, crescem orientações com maiores desvios do Goss ideal.

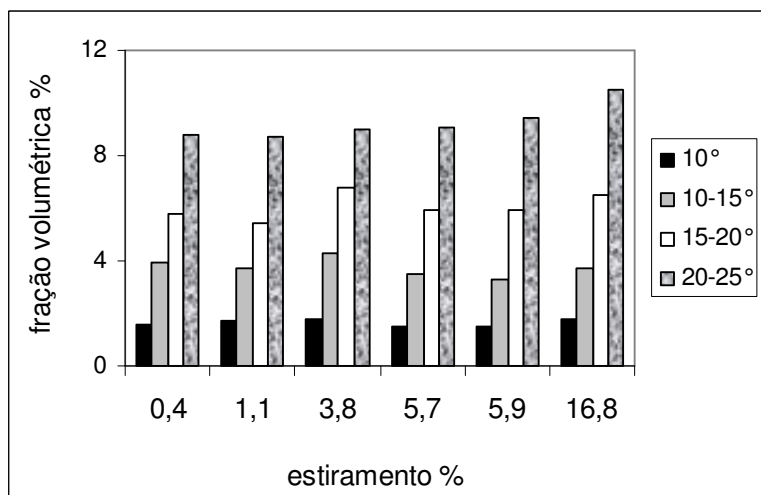


Figura 9 – Frações volumétricas das orientações com desvio de 10° a 25° de Goss

A Figura 10 mostra as FDOC's (Função de Distribuição de Orientações Cristalinas) texturas após recozimento e descarbonetação para 3 amostras, em seções no espaço de Euler para $\varphi_2 = 45^\circ$ e $\varphi_2 = 0$, notação de Bunge, e permite observar a principal mudança que ocorre com estiramento que é a convergência de $\{111\} \langle 11\bar{2} \rangle$ para $\{111\} \langle 1\bar{1}0 \rangle$ na fibra γ ($\varphi_2 = 45^\circ$).

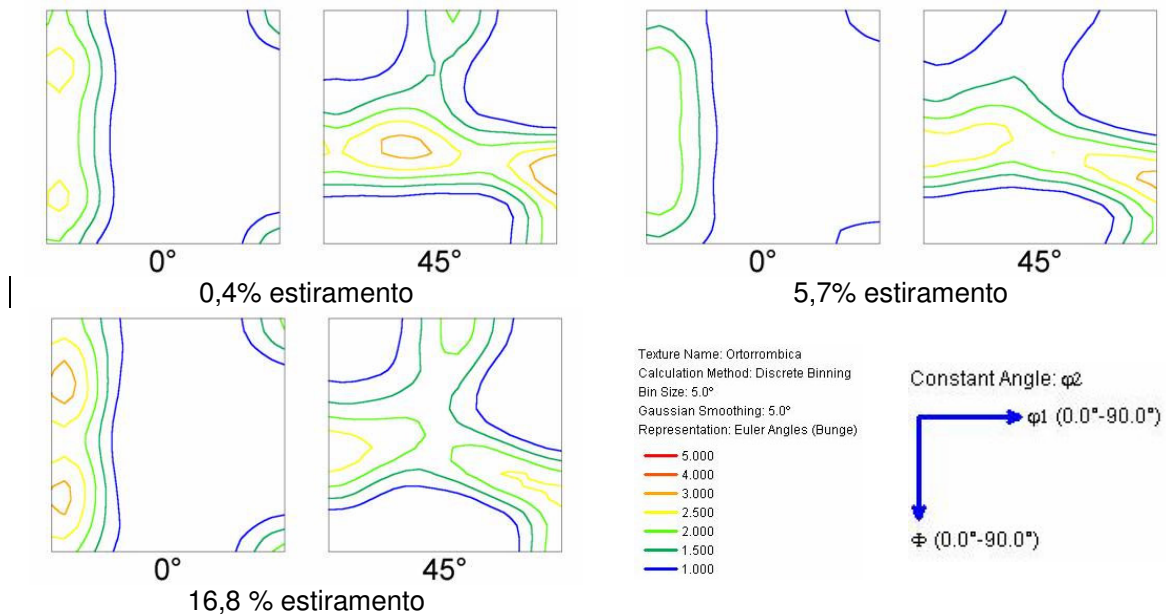


Figura 10 – FDOC's da matriz primária

A Figura 11 mostra a estrutura secundária em função do estiramento. Todas as amostras apresentaram recristalização secundária e pode se observar um aumento progressivo do tamanho médio de grão até cerca de 6% de estiramento. A Figura 12 sugere uma estabilização do tamanho do grão secundário acima de 6%. Nas amostras com estiramento alto, o grão secundário apresentou a maior dimensão na direção longitudinal, fato que pode estar relacionado com o mesmo comportamento no grão primário.

Foi medida a indução magnética (B8) a 800 A/m de amostras de 100 x 30 mm para avaliar a orientação dos grãos secundários. As amostras apresentaram valores entre 1.850 mT e 1.897mT no teste chapa única com 2 tiras, sendo que o melhor resultado foi obtido com 6% de estiramento. O produto RGO M4 produzido industrialmente com baixa tensão de tração na descarbonetação tem B8 médio 1.850 mT e um tamanho médio de grão entre 2 mm e 3 mm. O estiramento de 6% na descarbonetação praticamente triplicou o tamanho do grão secundário provavelmente, melhorando a orientação média dos grãos em relação ao Goss ideal, com ganho significativo de B8.

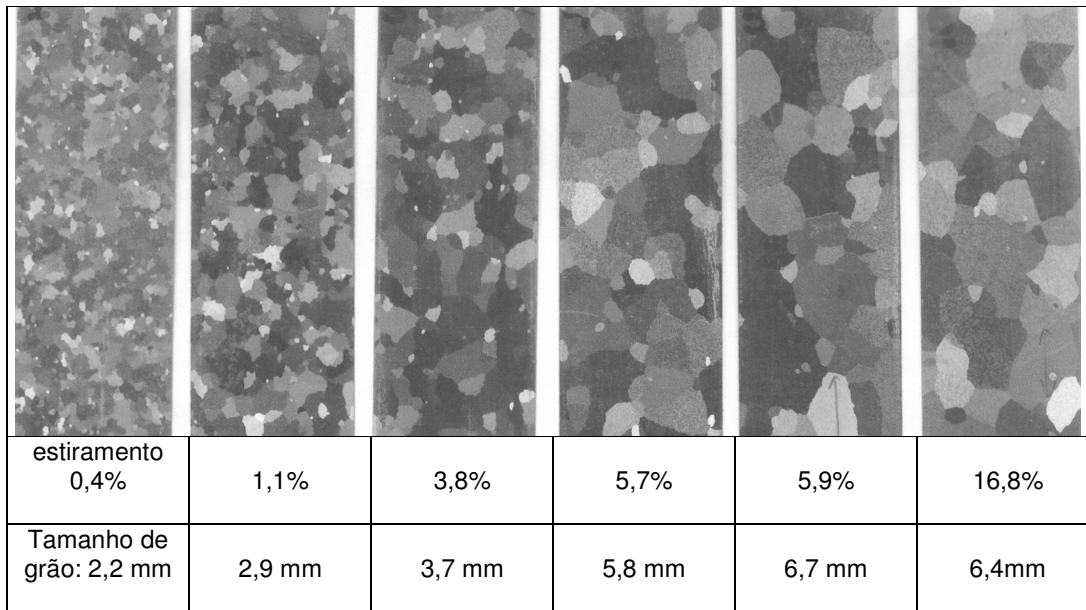


Figura 11 – Microestrutura de grãos após a recristalização secundária

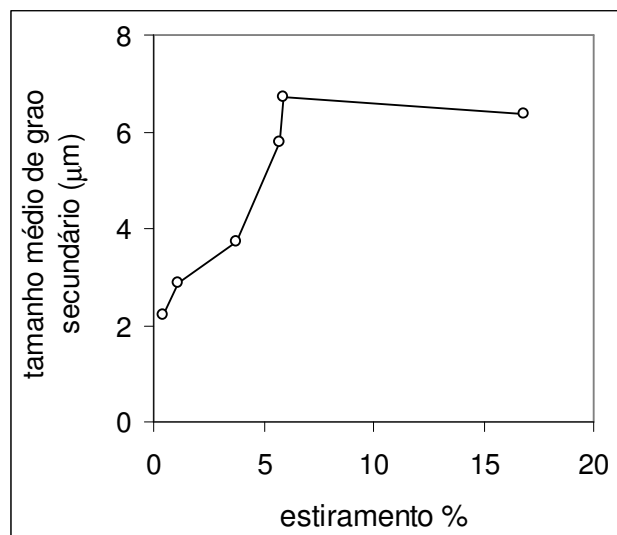


Figura 12 – Tamanho médio de grão secundário como uma função da % estiramento.

Trabalhos já realizados relacionaram bons resultados de indução com uma matriz primária rica em grãos que fazem contornos especiais CSL $\Sigma 5$ com Goss.⁽¹⁾ A hipótese a ser considerada é que os grãos secundários grandes e bem orientados obtidos com 6% de estiramento estariam ocorrendo a partir de uma matriz primária com poucos grãos de Goss (até 15° desvio) associados a uma vizinhança rica em contornos CSL $\Sigma 5$.

4 CONCLUSÃO

A descarbonetação sob alta tensão de tração da ordem de 15 a 25 MPa provoca um estiramento na tira de aço Si e uma redução de espessura. Com o estiramento crescente, o tamanho de grão da matriz primária aumenta e o material tende a formar sub-grãos próximos aos contornos de grão de alto ângulo. Além disso, o estiramento altera a textura da matriz primária, principalmente a fibra γ , com redução significativa da orientação $\{111\}\langle 11\bar{2}\rangle$ e aumento de $\{111\}\langle 1\bar{1}0\rangle$. O principal efeito na estrutura secundária é o aumento do tamanho de grão e uma melhoria na textura, evidenciada pelo aumento da indução magnética a 800 A/m.

REFERÊNCIAS

- 1 ALCÂNTARA, F. L.; CUNHA, M. A. Estudo da recristalização secundária do aço silício de grão orientado, Tecnologia Metalurgia e Materiais, ISSN 1807 – 2006,
- 2 LEE, K.T.; SPUZGAR, U.A., Can. Metall. Quartely, 34, 3, 1995, 257
- 3 KUMANO, T., HARATANI, t., USHIGAMI Y., Influence of primary recrystallization thorough thickness to secondary texture on grain oriented silicon steel, ISIJ, Vol 43, N 3, 2003, pp 400-409
- 4 HUMPHREYS, F.J. Quantitative metallography by electron backscattered diffraction, Journal of Microscopy, Vol 195, September 1999, pp 170-185
- 5 HUMPHREYS, F.J, HUANG, Y., BROUGH I., HARRIS, C., Electron backscatter diffraction of grain and subgrain structures – resolutions considerations, Journal of Microscopy, Vol 195, September 1999, pp 212-216
- 6 HUMPHREYS, F.J, HARTHERLY, M, Recrystallization and related annealing Phenomena, Second Edition, Elsevier, 2004
- 7 GLADMAN, T. The theory and Inhibition of abnormal grain growth in steels, JOM, set. 1992.
- 8 BISCONDI, M. Microstrucutura et comportement mecanique, Ecole dès Mines Saint Etienne, Ocotober 2002, 105-107