

EVOLUÇÃO DA TEXTURA DURANTE O PROCESSAMENTO DE AÇOS ELÉTRICOS 0,5%Si e 1,25%Si¹

Marcos Flávio de Campos²
Ivan Gilberto Sandoval Falleiros²
Fernando José Gomes Landgraf³
Gabriela Campos Fronzaglia⁴
Henrique Kahn⁴

RESUMO

Neste trabalho, observa-se como a textura cristalográfica de uma chapa de aço 0,5%Si desenvolve-se durante o processamento. Os resultados são também comparados aos de um aço com 1,25%Si e 0,22%Al, para verificar o efeito da composição química. A textura cristalográfica foi examinada nas seguintes etapas: i) bobina a quente ii) 80-90% de redução iii) recozido iv) após passe de encruamento v) após o recozimento final. A situação de textura da bobina a quente é muito similar para ambas as amostras: observa-se uma fibra $\langle 111 \rangle // \text{DN}$ de intensidade não muito alta. Após 80-90% de redução, observa-se uma típica textura de laminação sempre encontrada em aços, apresentando as fibras $\langle 110 \rangle // \text{DL}$ e $\langle 111 \rangle // \text{DN}$. Após recozimento, observa-se a presença de uma fibra $\langle 111 \rangle // \text{DN}$, com máximo em $\{111\} \langle 112 \rangle$. Após passe de encruamento e recozimento final, encontram-se entre os principais componentes a fibra $\{111\} \langle uvw \rangle$ e Goss (110) [001]. Os resultados indicam que a intensidade de Goss tende a aumentar quando diminui-se o passe de encruamento (e o tamanho de grão final aumenta). Aumentando-se os teores de Si (de 0,5% para 1,25% Si) e de Al (de ~0 para 0,22%) não se observam variações notáveis quanto aos componentes de textura encontrados.

Palavras chave: aços elétricos, textura, laminação

e_mail: mfdcampo@uol.com.br

1) Artigo submetido ao 57º Congresso Anual da ABM, 22 a 25 de julho de 2002, São Paulo SP

2) Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Av. Prof. Mello Moraes, 2463, cep 05508-900, São Paulo SP

3) Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

4) Departamento de Engenharia de Minas, Laboratório de Caracterização Tecnológica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

1 Introdução

A crise energética que vem prejudicando o Brasil mostra o acerto da decisão por pesquisar aços elétricos com menores perdas energéticas, uma linha de pesquisa que está sendo investigada com grande dedicação desde 1996 na Escola Politécnica da USP (Depto de Engenharia Metalúrgica de Materiais) e no IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo). O sucesso dessa investigação vem sendo demonstrado por uma grande quantidade de publicações a níveis nacional e internacional (ver por exemplo os recentes artigos FALLEIROS; CAMPOS (2001), LANDGRAF, TAKANOHASHI e CAMPOS (2001) e CAMPOS et al (2001)), bem como inúmeros dados que têm sido repassados ao importante e significativo setor produtivo brasileiro de aços e motores elétricos, sobre o qual não é exagero afirmar que é um dos mais competentes de todo o mundo nesta área.

Este trabalho insere-se na rota que visa reduzir as perdas (no cobre e no ferro; ver por exemplo a referência (CAMPOS, 2000)), por meio da otimização da textura cristalográfica. Há escassez de informações (na literatura nacional e internacional) sobre o desenvolvimento da textura cristalográfica durante o processamento de aços fins elétricos. O experimento descrito neste trabalho constitui parte de um grande esforço no sentido de acumular dados que possibilitem uma maior compreensão dos complexos fatores que afetam a textura.

Neste trabalho, observa-se como a textura cristalográfica de uma chapa de aço 0,5%Si desenvolve-se durante o processamento. Os resultados são também comparados aos de um aço com 1,25%Si e 0,22%Al, para verificar o efeito da composição química. A textura cristalográfica foi examinada nas seguintes etapas: i) bobina a quente ii) 80-90% de redução iii) recozido iv) após passe de encruamento v) após o recozimento final.

2 Procedimento Experimental

Amostras de aço foram submetidas a um processamento que procurou reproduzir as condições típicas empregadas pela indústria para a obtenção de chapas de aço empregadas em motores elétricos. A textura cristalográfica foi avaliada por meio de ODFs (função distribuição de orientações) a partir de figuras de polo medidas em difratômetro Philips X-Pert XRD equipado com goniômetro de textura, do Laboratório de Caracterização Tecnológica do Depto de Engenharia de Minas da Escola Politécnica da USP. Outros detalhes podem ser encontrados em CAMPOS (2000).

As ligas A e B permitem avaliar a evolução da textura no processamento de aços elétricos semi-processados, com diferentes teores de Si+Al. A tabela I apresenta a composição química dessas ligas.

Tabela I. Composição química e resistividade das ligas A e B

Liga	%Si	%Al	%Mn	%P	%S	N (ppm)	ρ ($\mu\Omega$.cm)
A	0,54	0,04	0,31	0,045	0,006	53	20,5
B	1,25	0,22	0,3	0,01	0,005	54	32

As amostras A e B foram submetidas ao seguinte processamento:

Os lingotes foram submetidos a laminação a quente:

início da laminação 1150°C

temperatura de acabamento 900°C

e mais 5 h a 750° C

resultando em liga A: TG $18 \pm 2 \mu\text{m}$ (2,8 mm de espessura)

liga B: TG $16 \pm 2 \mu\text{m}$ (2,5 mm de espessura)

Estas amostras serão denominadas A-BQ, e B-BQ

(sendo BQ abreviação de bobina a quente)

As mesmas amostras foram, posteriormente, laminadas a frio, de espessura de ~2,7 mm até ~0,53 mm, perfazendo aproximadamente 80% de grau de redução (o grau de redução é definido como sendo: (espessura inicial - espessura final) / espessura inicial).

As amostras BQ laminadas a frio serão denominadas A-BF e B-BF. Essas amostras foram submetidas a dois tipos de recozimentos intermediários, um sob nitrogênio e outro sob vácuo.

Ciclo sob:

Nitrogênio:

680°C por 5h, aquecimento e resfriamento lentos

Vácuo:

720° C por 5 min, aquecimento em 40min., resfriamento a 200°C/h

Após esses ciclos, o tamanho de grão observado foi:

(N: $14-15 \pm 2 \mu\text{m}$) (V: $11-12 \pm 2 \mu\text{m}$)

As amostras, após o recozimento intermediário, serão chamadas de A e B (seguido de N ou V, conforme o tipo de recozimento).

Tabela II. Código referente às denominações recebidas por diferentes amostras das ligas A e B

código	etapa do processo
BQ	bobina a quente
BF	bobina a quente, mais ~80% de redução
N	após recozimento intermediário sob nitrogênio
V	após recozimento intermediário sob vácuo
XX%	grau de passe de encruamento
RF	recozimento final

A nomenclatura adotada para as amostras das séries A e B é expressa na tabela II.

Após o recozimento intermediário, as amostras A e B sofreram “skin-pass”, ou passe de encruamento (ou, ainda, laminação de encruamento) de diversas ordens, entre 4 e 20%. Depois, foram submetidas a um recozimento final. Assim, a denominação XX%, apresenta o grau de “skin-pass”, e RF indica que ocorreu recozimento final.

3 Resultados e Discussão

3.1 Evolução da textura durante o processamento de um aço elétrico 0,5%Si (liga A)

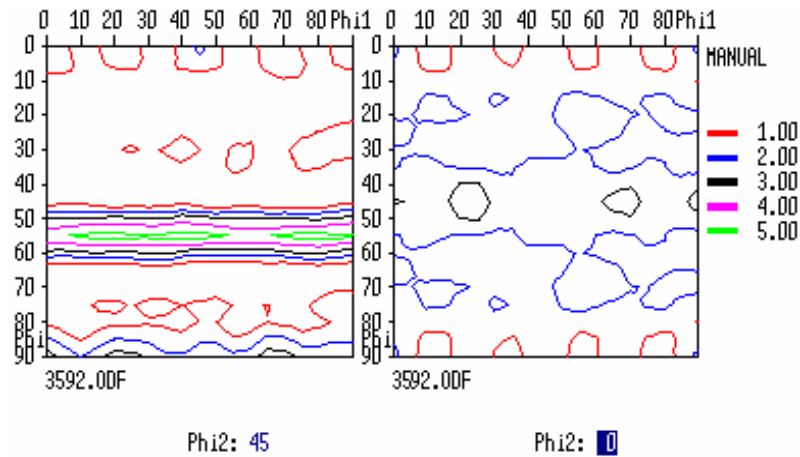


Figura 1. Amostra A-BQ. ODF, seções $\varphi_2=45^\circ$ e $\varphi_2=0^\circ$. Notação de Bunge.

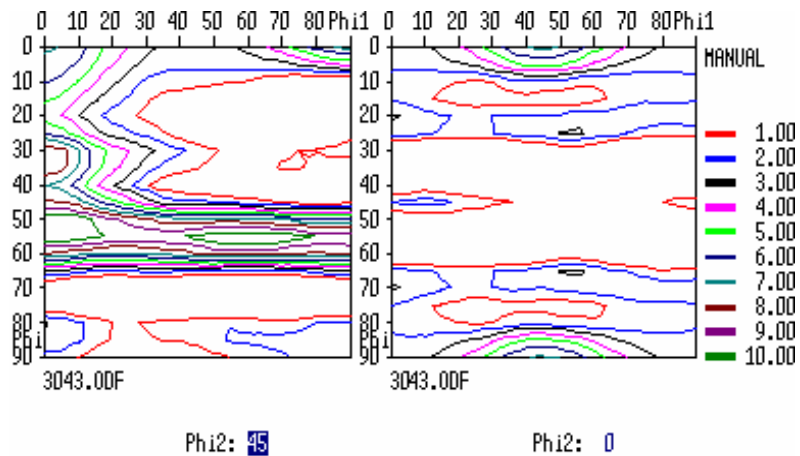


Figura 2. Amostra A-BF. ODF, seções $\varphi_2=45^\circ$ e $\varphi_2=0^\circ$. Notação de Bunge.

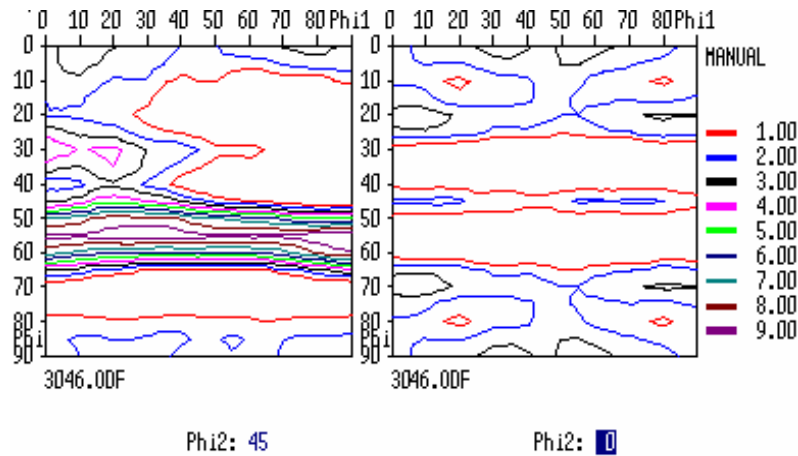


Figura 3. Amostra A-N. ODF, seções $\varphi_2=45^\circ$ e $\varphi_2=0^\circ$. Notação de Bunge.

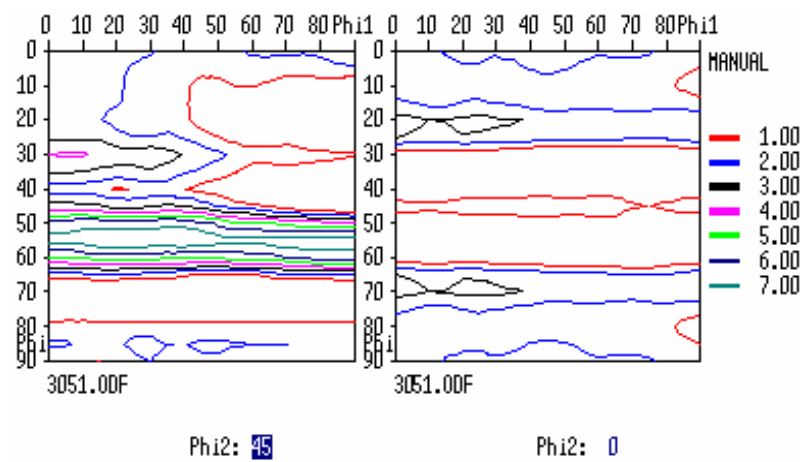


Figura 4. Amostra A-V. ODF, seções $\varphi_2=45^\circ$ e $\varphi_2=0^\circ$. Notação de Bunge.

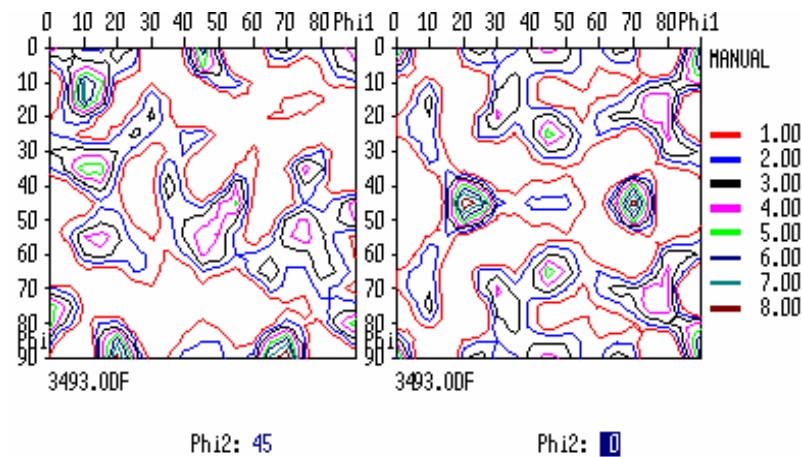


Figura 5. Amostra A-V 4%RF. ODF, seções $\varphi_2=45^\circ$ e $\varphi_2=0^\circ$. Notação de Bunge.

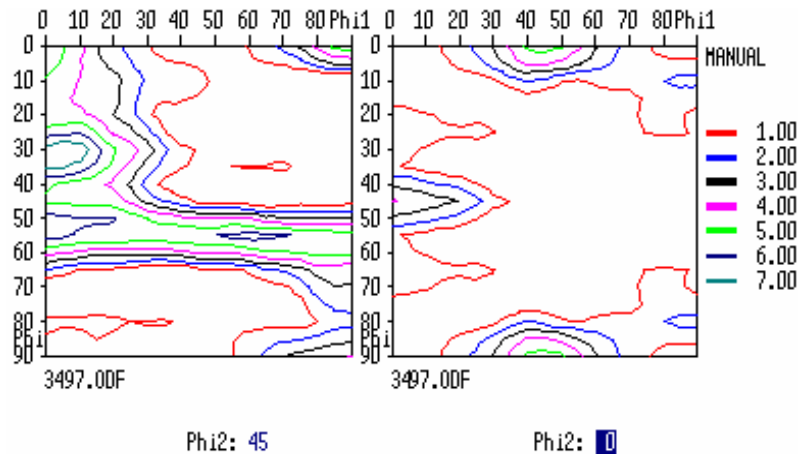


Figura 6. Amostra A-V 17%RF. ODF, seções $\varphi_2=45^\circ$ e $\varphi_2=0^\circ$. Notação de Bunge.

Na amostra A-BQ (figura 1), observa-se uma fibra $\langle 111 \rangle // \text{DN}$, com máximo para $\{111\} \langle 321 \rangle$ e $\{111\} \langle 211 \rangle$. Também há presença de planos $\{110\}$: um pouco de Goss $(110) [001]$, $(110) [1\bar{1}0]$, $(110) [2\bar{2}7]$, $(110) [2\bar{2}1]$.

Observa-se na amostra A-BF (figura 2) uma típica textura de laminação sempre encontrada em aços, apresentando as fibras $\langle 110 \rangle // \text{DL}$ e $\langle 111 \rangle // \text{DN}$ (esta com máximo em $\{111\} \langle 110 \rangle$).

Na amostra A-N (figura 3) também está presente uma fibra $\langle 111 \rangle // \text{DN}$, mas agora com máximo em $\{111\} \langle 112 \rangle$. Também observa-se $\{100\} \langle 032 \rangle$, $\{310\} \langle 001 \rangle$, $\approx (225) [3\bar{5}1]$. Notar que vários componentes de recristalização tendem a aparecer em uma faixa com diferença de orientação entre 15° a 35° em relação a componentes presentes na condição anterior (amostra A-BF, figura 2).

Para a amostra A-V (figura 4) é observada a mesma tendência geral notada na amostra A-N (figura 3), porém com distribuição mais randômica de componentes e intensidade da fibra $\langle 111 \rangle // \text{DN}$ levemente mais baixa.

Duas amostras A-V receberam passes de encruamento de 4% e 17%. Após um recozimento final (com ocorrência de recristalização), a amostra A-V 4%RF apresentou tamanho de grão de $360 \mu\text{m}$, enquanto que, na amostra A-V 17%RF, $48 \mu\text{m}$ foi o tamanho de grão resultante.

O tamanho de grão da amostra A-V 4%RF é muito grande, implicando em pequeno número de grãos observados durante as medidas de figura de polo. Essa pequena amostragem não garante que os resultados apresentados sejam verdadeiramente representativos. Na figura 4.1.5 observa-se: cubo-na-face $\{100\} \langle 001 \rangle$, $(110) [3,3,11]$, $(110) [2\bar{2}1]$, $(331) [1\bar{1}0]$, $(112) [5\bar{7}1]$, $(116) [2\bar{3}0]$, entre os principais componentes.

Na amostra A-V 4%RF, também observa-se a tendência de “inversão” do máximo da fibra $\langle 111 \rangle // \text{DN}$ (neste caso máximo em $\{111\} \langle 110 \rangle$) após recristalização, notada na amostra A-N (comparar figura 3 com figura 2). A fibra $\langle 110 \rangle // \text{DL}$ também está presente. É importante ressaltar a considerável intensidade de Goss $(110) [001]$.

3.2 Evolução da textura durante o processamento de um aço elétrico 1,25%Si (liga B)

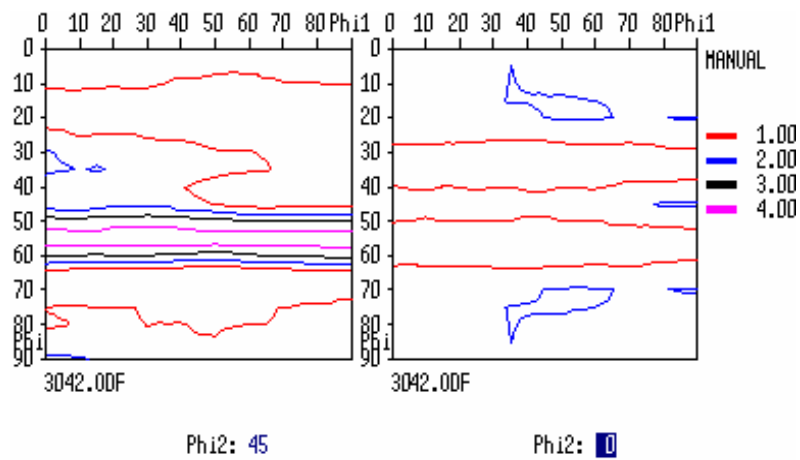


Figura 7 Amostra B-BQ. ODF, seções $\varphi_2=45^\circ$ e $\varphi_2=0^\circ$. Notação de Bunge.

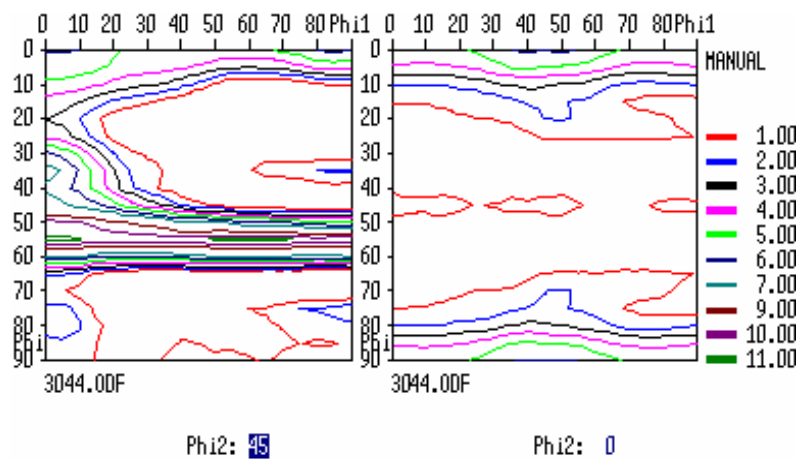


Figura 8. Amostra B-BF. ODF, seções $\varphi_2=45^\circ$ e $\varphi_2=0^\circ$. Notação de Bunge.

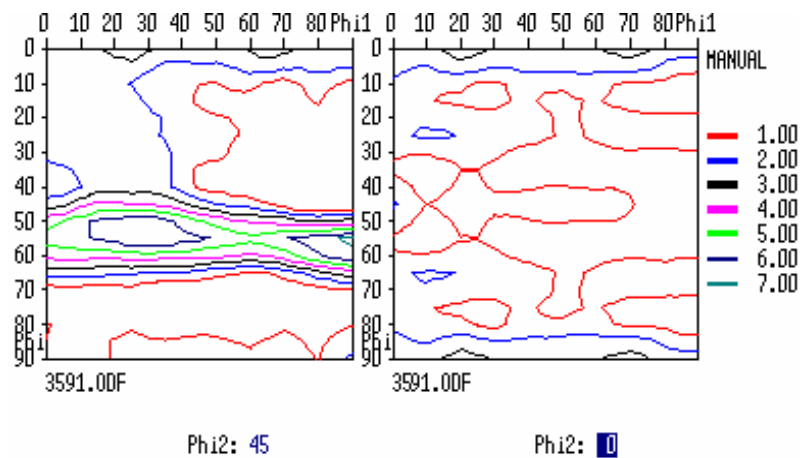


Figura 9. Amostra B-N. ODF, seções $\varphi_2=45^\circ$ e $\varphi_2=0^\circ$. Notação de Bunge.

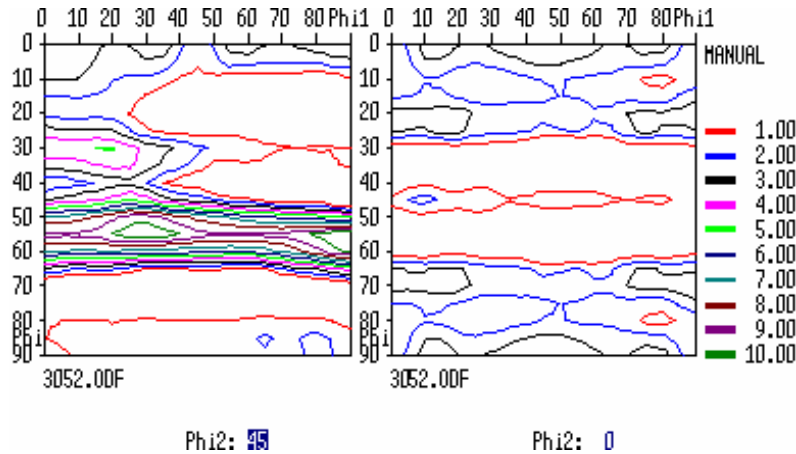


Figura 10. Amostra B-V. ODF, seções $\varphi_2=45^\circ$ e $\varphi_2=0^\circ$. Notação de Bunge.

A textura observada nas amostras da liga B, figuras 7 a 10 é muito semelhante à textura das amostras da liga A, apresentadas nas figuras 1 a 4. A diferença entre as amostras das ligas A e B são os teores de Si e Al, que podem ser observados na tabela I. Portanto, esses resultados permitem inferir que neste caso (ou seja, especificamente para o conjunto de experimentos em questão) a variação do teor de Si praticamente não afetou a textura.

Na amostra B-BQ (figura 7), observa-se uma fibra $\langle 111 \rangle // \text{DN}$ de fraca intensidade. A amostra B-BF (figura 8) apresenta, novamente (como a figura 2), uma típica textura de laminação contendo as fibras $\langle 110 \rangle // \text{DL}$ e $\langle 111 \rangle // \text{DN}$, esta última com máximo em $\{111\} \langle 110 \rangle$.

As amostras B-N (figura 9) e B-V (figura 10) apresentam os mesmos componentes basicamente observados nas amostras A-N (figura 3) e A-V (figura 4). As amostras B-N e B-V apresentam forte fibra $\{111\} \langle uvw \rangle$ com máximo em $\{111\} \langle 112 \rangle$. Outros componentes observados são $\{520\} \langle 001 \rangle$, $\{100\} \langle 011 \rangle$, $(310) [1\bar{3}0]$, $\approx (337) [3\bar{5}1]$. Notar novamente que vários componentes de recristalização ocupam regiões com diferença de orientação entre 15° a 35° em relação a componentes presentes na condição anterior (amostra B-BF, figura 8).

4 Conclusões

Em ambas as amostras (0,5%Si e 1,25%Si e 0,22%Al), a situação da bobina a quente é muito similar: observa-se uma fibra $\langle 111 \rangle // \text{DN}$ de intensidade não muito alta. Após 80-90% de redução, observa-se uma típica textura de laminação sempre encontrada em aços, apresentando as fibras $\langle 110 \rangle // \text{DL}$ e $\langle 111 \rangle // \text{DN}$. Após recozimento, observa-se a presença de uma fibra $\langle 111 \rangle // \text{DN}$, com máximo em $\{111\} \langle 112 \rangle$. Após passe de encruamento e recozimento final, encontram-se entre os principais componentes a fibra $\{111\} \langle uvw \rangle$ e Goss $(110) [001]$. Os resultados indicam que a intensidade de Goss tende a aumentar quando diminui-se o passe de encruamento (e o tamanho de grão final aumenta). Aumentando-se os teores de Si

(de 0,5% para 1,25% Si) e de Al (para 0,22%) não se observam variações notáveis quanto aos componentes de textura encontrados.

Agradecimentos

MF de Campos agradece à FAPESP, pela bolsa de pós-doutorado no Brasil (Proc. 01/09122-4). Os demais autores agradecem ao apoio da FAPESP (Projeto Temático Proc. 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, 2000.

CAMPOS, M. F. de; FRONZAGLIA, G.C.; KAHN, H.; LANDGRAF, F.J.G. Efeito de leves graus de deformação (4-19%) sobre a textura e propriedades magnéticas de um aço elétrico 0,5% Si. In: Textura e relações de orientação: deformação, recristalização, crescimento de grão. Ed: AP TSCHIPTSCHIN et al. Escola Politécnica da USP, 2001. (em CD-ROM).

FALLEIROS, I.G.S.; CAMPOS, M. F. de Nucleação da Recristalização. In: Textura e relações de orientação: deformação, recristalização, crescimento de grão. Ed: AP TSCHIPTSCHIN et al. Escola Politécnica da USP, 2001, p. 39-48.

LANDGRAF, F.J.G.; TAKANOHASHI, R.; CAMPOS, M. F. de Tamanho de grão e textura nos aços elétricos de grão não-orientado. In: Textura e relações de orientação: deformação, recristalização, crescimento de grão. Ed: AP TSCHIPTSCHIN et al. Escola Politécnica da USP, 2001, p. 161-188.

TEXTURE EVOLUTION DURING THE PROCESSING OF ELECTRICAL STEELS WITH 0,5%Si AND 1,25%Si¹

Marcos Flávio de Campos²
Ivan Gilberto Sandoval Falleiros²
Fernando José Gomes Landgraf³
Gabriela Campos Fronzaglia⁴
Henrique Kahn⁴

ABSTRACT

The development of crystallographic texture of a 0.5%Si steel sheet is observed. The results were also compared with those of steel with 1.25%Si and 0.22%Al, to verify the effect of chemical composition. The texture was examined after the following steps: i) hot band ii) 80-90% of reduction iii) annealed iv) after skin pass v) after final annealing. The texture is very similar for both chemical compositions. The hot band presents a fiber $\langle 111 \rangle // ND$ with not very high intensity. After reduction of 80-90%, a typical lamination texture of steels is observed, containing the fibers $\langle 110 \rangle // LD$ and $\langle 111 \rangle // ND$. After annealing, the fiber $\langle 111 \rangle // ND$ is the most important component, but now with maximum at $\{111\} \langle 112 \rangle$. After skin pass and final annealing, the principal components are fiber $\{111\} \langle uvw \rangle$ and Goss (110) [001]. The results indicate that Goss intensity tends to increase for smaller values of skin pass (and final grain size also increases). The change of Si content (from 0.5% upto 1.25% Si) and of Al (from ~0 upto 0.22%) did not produce significant variation for the texture components.

Keywords: electrical steels, texture, lamination

e_mail: mfdcampo@uol.com.br

1) Article submitted for 57^o Congresso Anual da ABM, 22 a 25 de julho de 2002, São Paulo SP

2) Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Av. Prof. Mello Moraes, 2463, cep 05508-900, São Paulo SP

3) Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

4) Departamento de Engenharia de Minas, Laboratório de Caracterização Tecnológica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo