

# A TEXTURA DE LAMINAÇÃO A FRIO DE UM AÇO PARA FIM ELÉTRICO GNO<sup>1</sup>

Augusto César Lacerda de Oliveira<sup>2</sup>  
Marcos Flávio de Campos<sup>2</sup>  
Verner Volfram Wolgien<sup>3</sup>  
Nilza Cristina S.B. Zwirman<sup>3</sup>  
Paulo Rangel Rios<sup>2</sup>

## Resumo

A qualidade dos aços para fins elétricos é altamente dependente da textura cristalográfica, sendo que a textura mais favorável para aplicações em motores elétricos pode ser descrita como  $\{100\}<0vw>$ . Para aprimorar a textura final dos aços para fins elétricos é essencial conhecer como esta varia em função da deformação plástica. Com o objetivo de investigar o efeito da laminação sobre a textura, uma bobina a quente (BQ) proveniente de um laminador industrial foi laminada a frio em escala piloto com diferentes graus de redução: 10%, 40%, 50%, 60%, 70% e 90%. A textura cristalográfica foi determinada para todos os níveis de redução segundo o método da figura de pólo inversa. Esta abordagem permitiu ainda obter informações sobre a energia armazenada na deformação para cada orientação, através da observação do alargamento dos picos de difração com a deformação plástica. A textura cristalográfica dos aços para fins elétricos no estado deformado apresenta similaridades com a textura dos aços IF (“intersticial free”) e LC (“Low Carbon”). Observou-se que a deformação plástica aumenta a intensidade do componente  $\{100\}$ , o que é um dado importante para a otimização da textura desses aços. .

**Palavras-chave:** Aços elétricos; Textura.

<sup>1</sup> Artigo submetido ao 60º Congresso Anual da ABM, 25 a 28 de julho de 2005, Belo Horizonte MG  
<sup>2</sup> Programa de pós-graduação em Engenharia Metalúrgica – Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda – Universidade Federal Fluminense, Av. dos Trabalhadores 420, Vila Santa Cecília, CEP 27255-125, Volta Redonda, RJ.  
<sup>3</sup> Centro de Pesquisas da CSN, Companhia Siderúrgica Nacional, Rua 4, nº33, Bairro Conforto, CEP 27269-900, Volta Redonda, RJ.

## 1 INTRODUÇÃO

A cadeia produtiva dos aços para fins elétricos envolve muitas etapas distintas em série, as quais apresentam diferentes efeitos sobre o desempenho destes aços em serviço. Geralmente, o início do controle operacional para a fabricação deste tipo de aço se dá nas Aciarias, com o controle das faixas de composição química (por exemplo, o controle do teor de silício é importante, pois impacta diretamente sobre a resistividade do material afetando assim as perdas magnéticas), controle das partículas de segunda fase que se originam durante o processo de refino (por exemplo,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{MgO}$ ) e o controle durante o lingotamento contínuo.

A próxima etapa, não menos importante e pesquisada, é a laminação a quente (processamento termomecânico). Nesta área ainda existem muitas dúvidas a serem esclarecidas, tais como: a quantidade ideal de redução, as temperaturas precisas de bobinamento (CT – “Coiling temperature”) e Acabamento (FDT – “Finish Delivery temperature”).

Procura-se no produto final a adequação de propriedades como: tamanho de grão, textura, espessura de saída da tira e encruamento residual do produto laminado a quente (BQ). Não obstante o controle de todas essas propriedades, existe ainda a necessidade do controle da laminação a frio no que diz respeito a quantidade de redução, pois, acredita-se que durante a recristalização dos aços (mais em geral materiais CCC) exista a herança de algumas componentes do presentes no estado deformado.

Aços extra baixo carbono ou IF quando deformados previamente acima de 40% tendem a formar durante a recristalização uma única textura de fibra  $\{111\}\langle uvw \rangle$  (e por vezes picos são observados, dentro da fibra, em  $\{111\}\langle 1-10 \rangle$  ou  $\{111\}\langle 11-2 \rangle$  (HUMPHREYS; HATHERLY, 1996)). Abaixo de 40% de redução aproximadamente temos uma certa retenção da textura de laminação. Este fato só vem reforçar a necessidade da compreensão do estado deformado e ratificar a sua influência sobre as texturas de recristalização. A textura de laminação (no caso de materiais CCC laminados a frio) compreende Fibra parcial  $\{hkl\}\langle 110 \rangle$  onde  $\{hkl\}$  se estende desde  $\{001\}$  até aproximadamente  $\{223\}$ , além de  $\{111\}\langle uvw \rangle$  (HUMPHREYS; HATHERLY, 1996).

Com o objetivo de investigar o efeito da laminação sobre a textura, uma bobina a quente (BQ) proveniente de um laminador industrial foi laminada a frio em escala piloto com diferentes graus de redução: 10%, 40%, 50%, 60%, 70% e 90%. A textura cristalográfica foi determinada para todos os níveis de redução segundo o método da figura de pólo inversa. A medida da largura do pico a meia-altura “Full-width at Half-maximum” (FWHM) foi também realizada, com o intuito de obter informações sobre a energia armazenada na deformação.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

O aço para fim elétrico estudado possui 0,18% Si, 0,63% Mn, 0,2%Al, 0,1%P, além de outros elementos inferiores a 0,1% (OLIVEIRA, 2004), (OLIVEIRA et al, 2004). A bobina a quente apresentava originalmente 2,5mm de espessura e sofreu reduções progressivas em um laminador Duo reversível de 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 60%, 70% e 90%, Após as reduções a frio, todas as amostras (incluindo a BQ de referência) foram decapadas em solução de HCL 10%.

A textura cristalográfica via difração de raios X foi determinada pelo método da figura de pólo Inversa em difratômetro Siemens D5000 em conjunto com um método numérico para a obtenção das respectivas intensidades relativas.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

**Tabela 1.** Resultados de medida por Difração de Raios-X, utilizados para plotar as Figuras de polo Inversa e obter o FWHM.

Redução da amostra (%)	<i>Medida da área dos planos [2 theta.cps]</i>					<i>Full-width at Half-maximum (FWHM)[2 theta]</i>				
	{110}	{200}	{211}	{310}	{222}	{110}	{200}	{211}	{310}	{222}
0	1420,50	158,79	343,72	199,80	54,95	0,18	0,29	0,13	0,15	0,07
10	675,63	266,36	342,78	195,14	63,36	0,22	0,37	0,41	0,75	0,32
40	321,49	686,69	612,20	87,83	87,19	0,29	0,45	0,49	0,80	0,90
50	263,85	897,69	643,36	79,83	85,92	0,28	0,44	0,51	0,53	1,12
60	188,78	958,44	676,60	60,91	118,89	0,22	0,44	0,48	0,47	1,34
70	170,78	1020,22	624,47	57,71	105,37	0,28	0,46	0,46	0,74	1,42
90	221,57	1191,05	642,86	54,94	99,95	0,27	0,40	0,44	0,69	1,52

### 3.1 Estimativa da Energia Armazenada na Deformação

Para poder estimar quantitativamente a energia armazenada na deformação, é necessário conhecer o alargamento experimental ('experimental broadening'). Isto é feito através de um padrão apropriado, um cristal como por exemplo  $LaB_6$  o qual pouco deforma-se plasticamente (rompe antes que ocorre significativa deformação plástica) (CULLITY; STOCK, 2001). Esse procedimento não foi realizado aqui, portanto estamos apresentando apenas as medidas de FWHM na Tabela 1. Porém, se o alargamento experimental fosse conhecido, poríamos utilizar as equações descritas em trabalho prévio (CAMPOS et al., 2004a) para estimar a energia armazenada.

A deformação a frio de metais e ligas policristalinas não é uniforme. Por exemplo, quando um metal é deformado por laminação ocorre o deslizamento de planos cristalinos em cada grão e estes mudam as suas formas, esta mudança de forma, no entanto não é função somente da força externa aplicada, mas também resultante da interação entre os grãos dos arredores. Estas restrições fazem com que certas regiões do policristal experimentem uma deformação plástica enquanto outras apresentam deformação elástica, esse comportamento confere ao agregado a

possibilidade de conter “tensão residual” (este termo define que existe tensão no agregado policristalino mesmo após a remoção das forças externas) (CULLITY; STOCK, 2001). Esta tensão residual faz com que os picos de difração sofram alargamento conforme exemplificado pela Figura 1.

Geralmente, o tamanho do alargamento dos picos de difração são devidos ao tamanho de cristalito (pode ser tamanho de célula de deformação), microdeformação (tensão residual) e efeitos instrumentais (CULLITY; STOCK, 2001). A medida de B (do inglês Broadening) ou alargamento é realizada pela metodologia do FWHM (Full width at half maximum) onde se realiza a medida da largura do pico de difração (em graus) na metade da intensidade máxima. Para exemplificar, é mostrada a equação (1), que descreve as três contribuições para o alargamento, a qual aplica-se desde que o formato do pico de difração seja uma distribuição do tipo Cauchy (CAMPOS et al., 2004a):

$$B_{exp.} = B_{TG} + B_{DEF.} + B_{INST.} \quad (1)$$

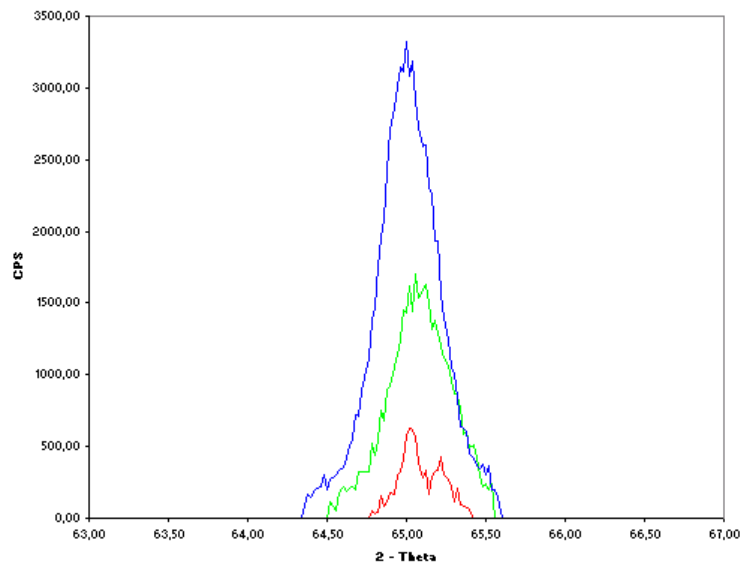
Onde  $B_{exp.}$  é alargamento do pico medido experimentalmente,  $B_{TG}$  é o alargamento do pico devido ao tamanho de cristalito do agregado policristalino, que para tamanhos de grão maiores que  $0,1\mu m$  pode ser considerado desprezível. O  $B_{inst.}$  é o alargamento do pico devido à somente o equipamento de medição (intrínseco a todo e qualquer equipamento de raios X, e que depende das condições de medida, como por exemplo tensão, corrente, tempo de aquisição). Devemos ressaltar que a equação (1) só é válida para picos de difração com distribuição de Lorentz.

Convém ainda mencionar que em recente estudo (SILVA et al., 2004), confirmamos que um plano pode armazenar mais ou menos energia, dependendo da direção de deformação. Por exemplo, a energia armazenada é maior para (110) [1-10] do que para (110) [001] (SILVA et al, 2004). Este detalhe faz com que o resultado de energia armazenada determinada pelo método acima mencionado deva ser analisado com cuidado, pois trata-se apenas de uma média.

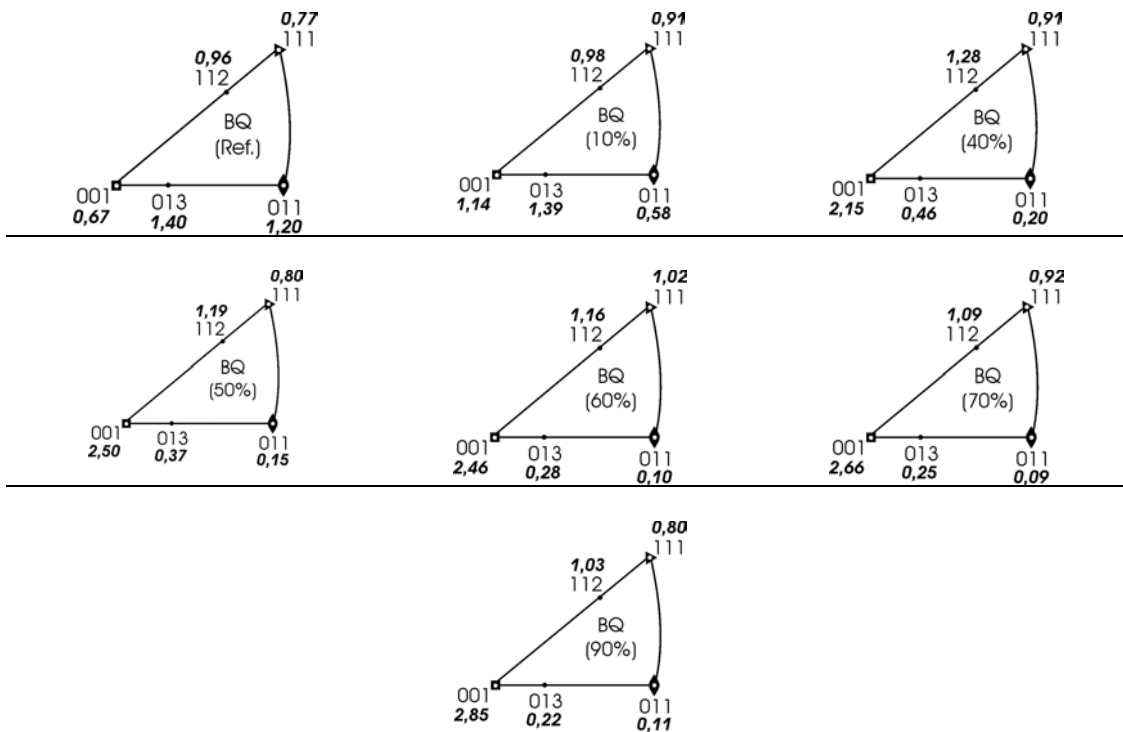
### **3.2 Evolução da textura com a Deformação Plástica**

A Figura 1 mostra que a intensidade do componente {200}, o mais benéfico para as propriedades magnéticas aumenta com a deformação plástica. O desafio é descobrir como manter esse componente nas etapas subseqüentes do processamento, as quais incluem recristalização.

As figuras de polo Inversa podem ser observadas na seqüência da Figura 2 e descrevem o comportamento da textura cristalográfica do aço para fim elétrico em estudo. A evolução da textura cristalográfica mostrada na figura 2 está de acordo com o que foi descrito na literatura para materiais CCC laminados a frio (CAMPOS, 2000), e também com que foi observado recentemente em outro estudo sobre textura de aços elétricos (CAMPOS et al., 2004b).



**Figura 1.** Difratoograma das amostras BQ (ref.), 40% e 90% de redução demonstrando o alargamento do pico {200} de difração.



**Figura 2.** Seqüência de figuras de pólo Inversa demonstrando que a intensidade dos componentes de textura {200}, {111} e {211} aumenta com a deformação plástica, e que a intensidade dos componentes {110} e {310} diminui com a deformação plástica.

A textura dos aços para fins elétricos quando submetidos à deformação plástica (laminação) se aproxima muito da textura de laminação dos aços para estampagem. Resultado similar foi obtido por PERO-SANZ et al. (1999) para os aços LC ('low carbon') e IF ('interstitial free') também segundo a metodologia da figura inversa de polo. Ao compararmos as texturas de deformação dos aços LC e IF obtidas por PERO-SANZ et al. (1999), observamos que estas são muito similares à do aço elétrico, apresentando o fortalecimento das famílias de planos {100} e {111} e o enfraquecimento da família de planos {110}.

Acreditamos que a diferença de composição química poderia ocasionar diferença de textura, pois o aço para fim elétrico utiliza um grande teor de silício e manganês. Além disso, o processamento termomecânico é acentuadamente diferente. Porém, estamos observando que a textura de deformação é basicamente função da variável estrutura cristalina (CCC). Convém ainda notar que este item precisa ser melhor explorado.

#### **4 CONCLUSÕES**

A intensidade dos componentes de textura {200}, {111} e {211} aumenta com a deformação plástica, enquanto que a intensidade dos componentes {110} e {310} diminui com a deformação plástica.

A textura cristalográfica de deformação dos aços para fins elétricos apresenta muita similaridade com a textura dos aços IF ("interstitial free") e LC ("Low Carbon").

Observou-se que a deformação plástica aumenta a intensidade do componente {100}, o que é um dado importante para a otimização da textura desses aços.

#### **Agradecimentos**

MF de Campos agradece à CAPES (programa ProDoc), A.C.L. de Oliveira agradece ao CNPq.

#### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- 1 CAMPOS M. F. de; Microestrutura, textura e propriedades magnéticas em aços elétricos. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, fevereiro de 2000.
- 2 CAMPOS, M. F. de; FALLEIROS, I.G.S.; LANDGRAF, F.J.G. Correlação entre energia armazenada na deformação e medidas magnéticas. In 59º Congresso Anual da ABM. Julho de 2004, São Paulo, SP, p. 1835-1844, 2004a.
- 3 CAMPOS, M.F. de; LANDGRAF, F.J.G.; FALLEIROS, I.G.S.; FRONZAGLIA, G.C.; KAHN, H. Texture evolution during the processing of electrical steels with 0.5% Si and 1.25% Si. ISIJ International, v. 44, p. 1733-1737, 2004b.

- 4 CULLITY, B.D.; STOCK, S.R. Elements of X-Ray Diffraction. Prentice Hall, New Jersey, 3<sup>rd</sup> edition, 2001.
- 5 HUMPHREYS, F. J.; HATHERLY, M. Recrystallization and related annealing phenomena. U.K., Pergamon, 1996.
- 6 OLIVEIRA, A. C. L. de. Trabalho de Formatura. EEIMVR- Universidade Federal Fluminense, 2004.
- 7 OLIVEIRA, A. C. L. de; CAMPOS, M. F. de; WOLGIEN, V. V.; SAMPAIO, A. P.; RIOS, P. R. A influência do tamanho de grão da bobina laminada a quente sobre a textura de um aço elétrico GNO. In 59<sup>o</sup> Congresso Anual da ABM. Julho de 2004, São Paulo, SP, p . 2922-2930.
- 8 PERO-SANZ, J.; RUIZ-DELGADO, M.; MARTINEZ, V.; VERDEJA, J. I. Materials Characterization, v. 43, p. 303–309, 1999.
- 9 SILVA, M. do C. A. da; CAMPOS, M. F. de; LANDGRAF, F.J.G.; FALLEIROS, I.G.S. Textura de recristalização de um aço com textura (110) [001] laminado em diferentes ângulos em relação à direção de laminação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS DOS MATERIAIS, 16, Porto Alegre, RS, 2004. Anais (em CD-ROM). p. 1-10.

# THE COLD-ROLLING TEXTURE OF A NON-ORIENTED ELECTRICAL STEEL<sup>1</sup>

Augusto César Lacerda de Oliveira<sup>2</sup>  
Marcos Flávio de Campos<sup>2</sup>  
Verner Volfram Wolgien<sup>3</sup>  
Nilza Cristina S.B. Zwirman<sup>3</sup>  
Paulo Rangel Rios<sup>2</sup>

## Abstract

The quality of the electrical steels depends strongly on the crystallographic texture, and the most favorable texture for electrical motors can be described as  $\{100\}\langle 0vw \rangle$ . To improve the final texture of electrical steels, it is essential know how texture changes as function of plastic deformation. With the aim of investigating the effect of the rolling on texture, a hot band was cold rolled under different reductions: 10%, 40%, 50%, 60%, 70% e 90%. The crystallographic texture was determined for all those reduction levels according the inverse pole figure method. This approach also allowed obtaining informations about the stored energy after deformation for each orientation, by means of the broadening of the X-Ray diffraction peaks due the plastic deformation. The crystallographic texture of the electrical steels after deformation presents similarities with the cold rolled texture of IF (“interstitial free”) and LC (“Low Carbon”) steels. It was observed that plastic deformation promotes large increase of the  $\{100\}$  component, which is a relevant information for optimizing the texture of these steels. .

**Key-words:** Electrical steels; Texture.

<sup>1</sup> Article submitted to the 60<sup>o</sup> Congresso Anual da ABM, 25 a 28 de julho de 2005, Belo Horizonte MG

<sup>2</sup> Programa de pós-graduação em Engenharia Metalúrgica – Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda – Universidade Federal Fluminense, Av. dos Trabalhadores 420, Vila Santa Cecília, CEP 27255-125, Volta Redonda, RJ.

<sup>3</sup> Centro de Pesquisas da CSN, Companhia Siderúrgica Nacional, Rua 4, nº33, Bairro Conforto, CEP 27269-900, Volta Redonda, RJ.