

EVOLUÇÃO DA MICROESTRUTURA E TEXTURA NO PROCESSAMENTO DE UM AÇO ELÉTRICO COM ALTO MANGANÊS

Augusto César Lacerda de Oliveira^{1,2}

Marcos Flávio de Campos^{3,*}

Nilza Cristina S. B. Zwirman²

Verner Wolgien²

Paulo Rangel Rios¹

*) Inmetro – Prédio 3 / DIMAT. Av. Nossa Senhora das Graças 50 Xerem –
Duque de Caxias RJ, 25250-020

mfcampos@inmetro.gov.br

- 1) Programa de pós-graduação em Engenharia Metalúrgica – Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda – Universidade Federal Fluminense.
- 2) Centro de Pesquisas da CSN, Companhia Siderúrgica Nacional.
- 3) Inmetro – Dimci/Dimat

RESUMO

Este estudo é sobre o efeito de um recozimento a 600°C no tamanho de grão e textura cristalográfica da bobina a quente (BQ). Posteriormente, a BQ sofreu laminação a frio (de 2,5 mm de espessura até 0,5 mm), recozimento contínuo a 780°C, laminação de encruamento e recozimento final (BFF). A textura foi determinada para todas as etapas segundo o Método da Figura de polo Inversa e ainda para as amostras após o recozimento final foi realizada a avaliação da textura pelo método das figuras de corrosão. Para o tamanho de grão da BQ > 100 µm é observada melhora na textura final devido a diminuição da intensidade de planos {222} e aumento da intensidade {310} e também da estabilização próximo ao valor randômico da intensidade {200}. Na BFF as figuras de corrosão revelaram a presença de orientações {100}<011>, {110}<001> e muitas orientações próximas a {111}.

PALAVRAS-CHAVES: aços elétricos, textura, crescimento de grão.

INTRODUÇÃO

Vários estudos recentes ^{(1),(2),(3) e (4)} têm mencionado o recozimento da bobina a quente (BQ) como um meio de melhorar as propriedades magnéticas de aços para fins elétricos. Um dos objetivos do presente trabalho é avaliar se esse procedimento tem efeito em um aço com teor Mn ligeiramente mais alto que o usual.

Neste trabalho, estuda-se o efeito de um recozimento a 600°C sobre o tamanho de grão e textura cristalográfica de uma bobina a quente (BQ). Posteriormente, a BQ foi submetida a laminação a frio, recozimento contínuo a 780°C, laminação de encruamento e recozimento final. A microestrutura e a textura cristalográfica foram avaliadas nas condições: bobina a quente (BQ), bobina a frio após recozimento contínuo (BF) e após a laminação de encruamento seguido de recozimento final (BFF).

O objetivo é determinar a existência de uma correlação entre textura cristalográfica da BQ versus a textura da BFF ou tamanho de grão da BQ versus textura cristalográfica da BFF para que seja possível adequar o processamento termomecânico do material laminado a quente, ou ainda, incluir uma etapa de recozimento da BQ para que se maximize as propriedades magnéticas dos aços para fins elétricos.

MATERIAIS E MÉTODOS

O aço estudado continha 0,58% Si, 0,63% Mn, 0,2% Al, 0,1% P, além de outros elementos com teores inferiores a 0,1%. A bobina a quente (BQ) apresentava originalmente ~ 2,5 mm de espessura sofrendo uma redução em um laminador duo reversível até ~ 0,5 mm. O recozimento isotérmico a 600°C foi realizado em um forno a resistência elétrica BRASIMET. A cinética do crescimento de grão da BQ é mostrada na figura 1. O recozimento contínuo a 780°C foi realizado no mesmo forno. As amostras foram decaçadas em ácido clorídrico 14% e submetidas logo após a laminação de encruamento no laminador tipo duo reversível (visando 5% de alongamento). O recozimento final foi realizado em um forno LINDBERG 51668HR com atmosfera controlada (90% N₂ e 10% H₂) e temperatura de encharque adotada de 770°C.

Medidas de tamanho de grão foram realizadas pelo método dos interceptos lineares (microscopia óptica). A textura cristalográfica foi determinada pelo Método da Figura de polo Inversa, em Difratorômetro Siemens D5000.

Figuras de corrosão (“etch-pits”) foram obtidas conforme o procedimento proposto por HORN; LOTTER ⁽⁵⁾.

O MEV ZEISS DSM 962 foi utilizado para a caracterização das figuras de corrosão.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A BQ em seu estado proveniente do laminador de tiras a quente 2 da CSN possuía grandes heterogeneidades microestruturais apresentando além de um “resto de encruamento”, uma distribuição bimodal de tamanhos de grão, ou seja, a amostra continha tanto grãos grandes (~ 17 μm) como também grãos menores (~7 μm). O recozimento da BQ foi responsável por eliminar a população de grãos menores em favorecimento da população de grãos maiores, e ainda o resto de encruamento foi eliminado. Para os grãos grandes a cinética de crescimento de grão é mostrada na figura 1.

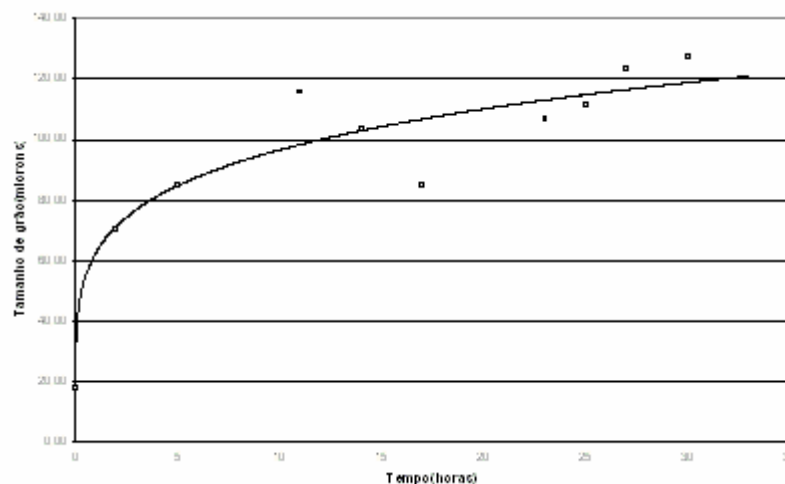


Figura 1 - Cinética do crescimento de grão ferrítico da bobina a quente (BQ).

Podemos verificar com base na figura 1 que o tamanho de grão da BQ foi variado desde ~ 17 μm até ~ 127 μm o que permitiu a verificação da influência do tamanho de grão da BQ sobre a textura cristalográfica da BFF.

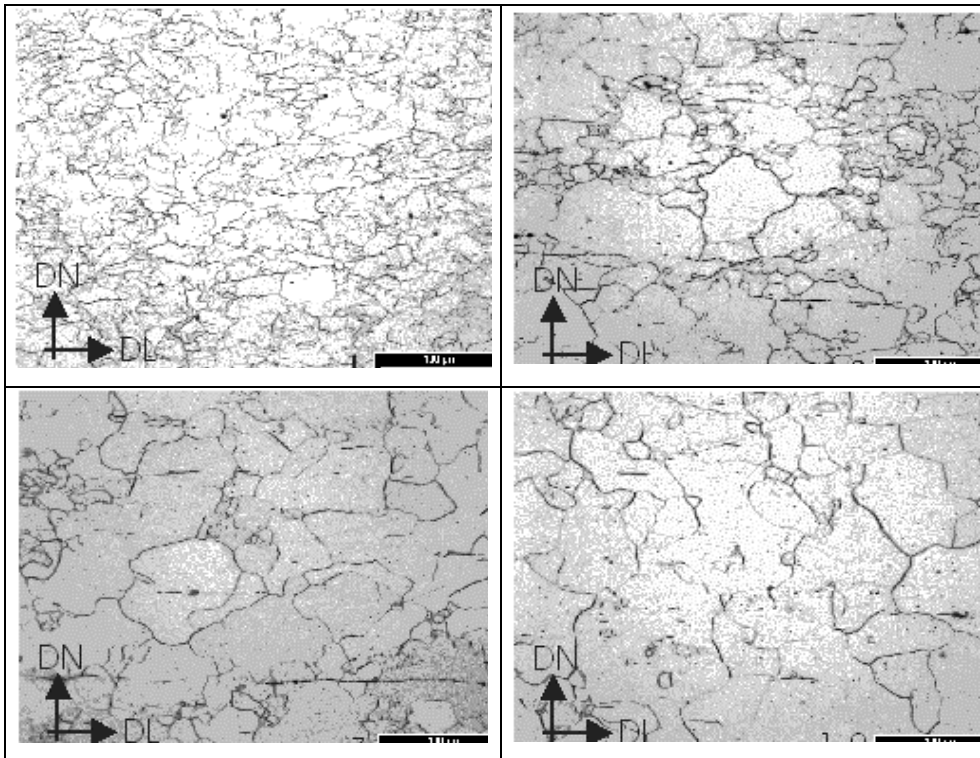


Figura 2 – Evolução microestrutural da BQ (amostras 1, 3, 7 e 10). Aumento: 200x

A evolução da textura cristalográfica da BQ com o tratamento térmico praticamente não sofreu alterações, sendo formada principalmente pelas famílias de planos $\{110\}$ e $\{310\}$ e ainda apresentando a família de planos $\{222\}$ sempre abaixo do valor aleatório.

Na BQ as famílias de planos $\{200\}$ e $\{211\}$ permanecem com intensidades próximas ao valor aleatório (1x) conforme pode ser verificado na figura 3.

Após a laminação a frio e recozimento contínuo das amostras toda heterogeneidade encontrada na BQ foi eliminada, sendo a BF constituída de uma distribuição homogênea de grãos ferríticos poligonais e praticamente não apresentando variações no tamanho de grão ($\sim 13 \mu\text{m}$ até $\sim 17 \mu\text{m}$) como pode ser visto na figura 4.

Mesmo apresentando uma grande semelhança microestrutural a textura da BF varia em função do tamanho de grão da BQ, e como pode ser visto na figura 5 a partir do tamanho de grão da amostra 7 ($\sim 106.87 \mu\text{m}$) temos uma recuperação da intensidade da família de planos $\{110\}$.

O comportamento das famílias de planos $\{200\}$ e $\{310\}$, mesmo com tantas variações, sempre estão ao redor do valor aleatório (1x). Uma observação interessante é que nesta fase do processamento a família de planos $\{211\}$ é

diretamente proporcional ao tamanho de grão da BQ após a amostra 7. Um outro comportamento que ainda precisa ser abordado é o da família {222} e fica claro que quanto maior o tamanho de grão da BQ menor será a sua intensidade relativa (desconsiderando a amostra 1 que apresentava resto de encruamento na BQ). A família de planos {222} na amostra 10 foi praticamente eliminada dando lugar aos planos da família {211}.

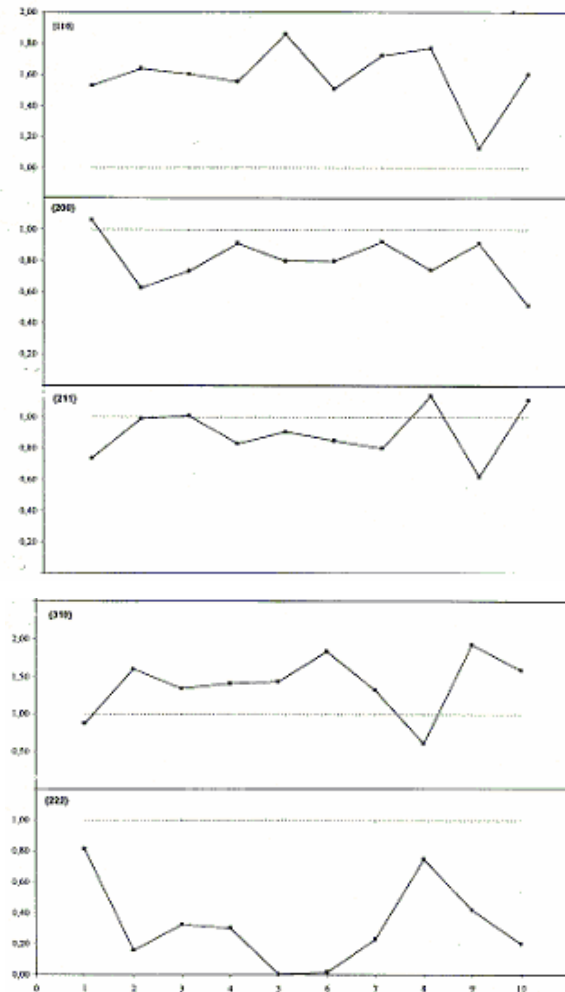


Figura 3 – Influência do tratamento térmico de recozimento a 600°C sobre a textura cristalográfica da BQ. A linha tracejada representa a intensidade aleatória.

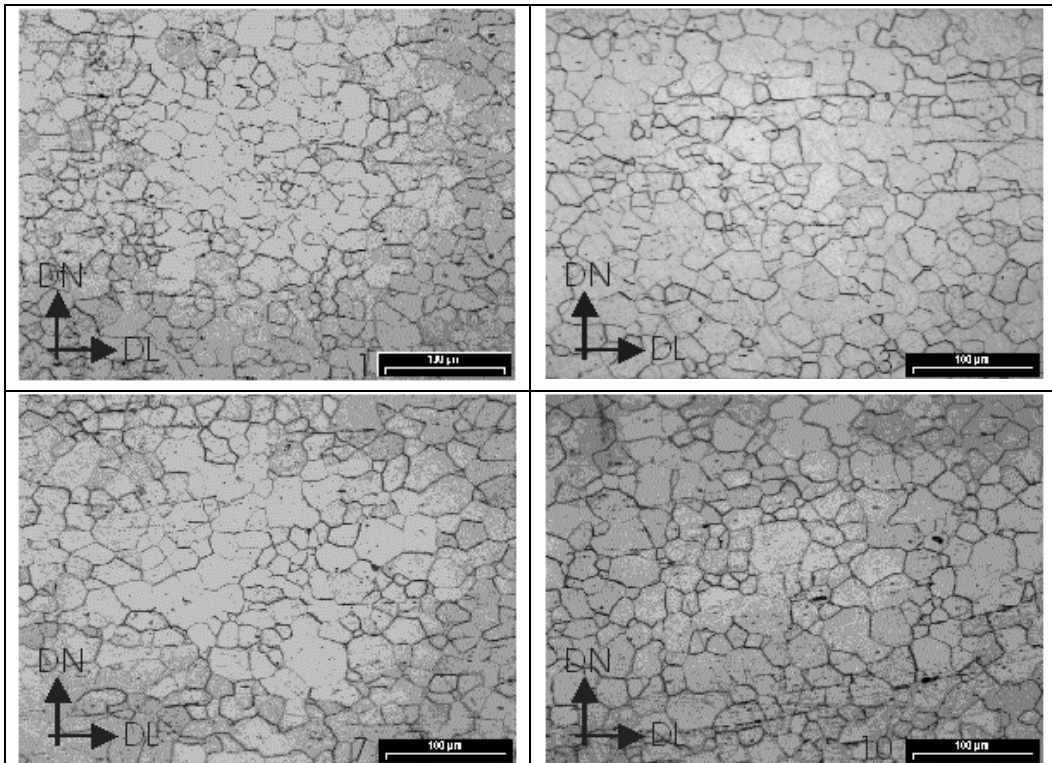


Figura 4 – Evolução microestrutural da BF (amostras 1, 3, 7 e 10). Aumento: 200x

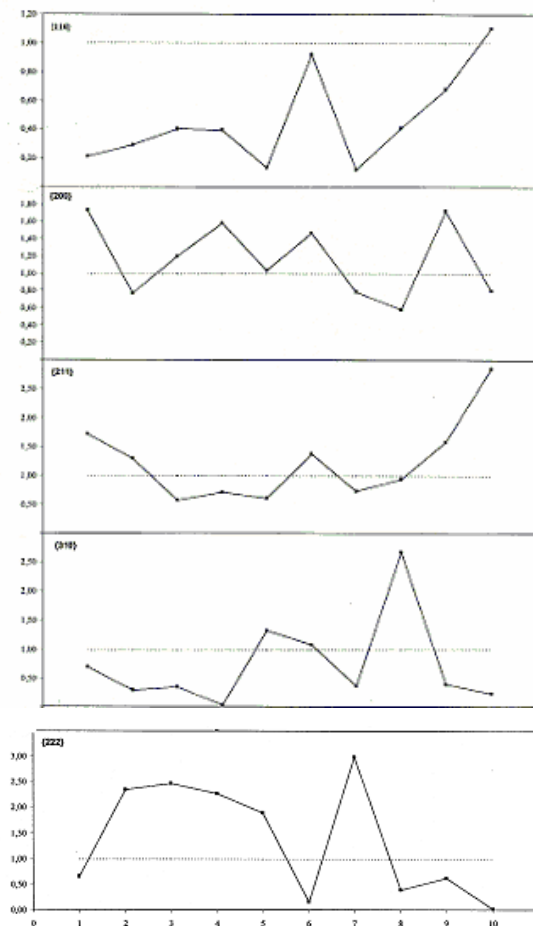


Figura 5 – Influência da variação do tamanho de grão da BQ sobre a textura cristalográfica da BF. A linha tracejada representa a intensidade aleatória.

As alterações na textura da BF apresentadas anteriormente têm sido atribuídas⁽²⁾ à fase de nucleação da recristalização, pois existe uma diferença marcante em deformar um material com tamanho de grão pequeno e outro com tamanho de grão grande. O local preferencial da nucleação do grão recristalizado é alterado, e por sua vez ao nuclear em diferentes regiões a textura cristalográfica também é afetada. Não é objetivo deste trabalho explorar em mais detalhes tais questões.

Após a laminação de encruamento e recozimento final, o tamanho de grão das amostras ficaram em torno de 500µm a 700µm.

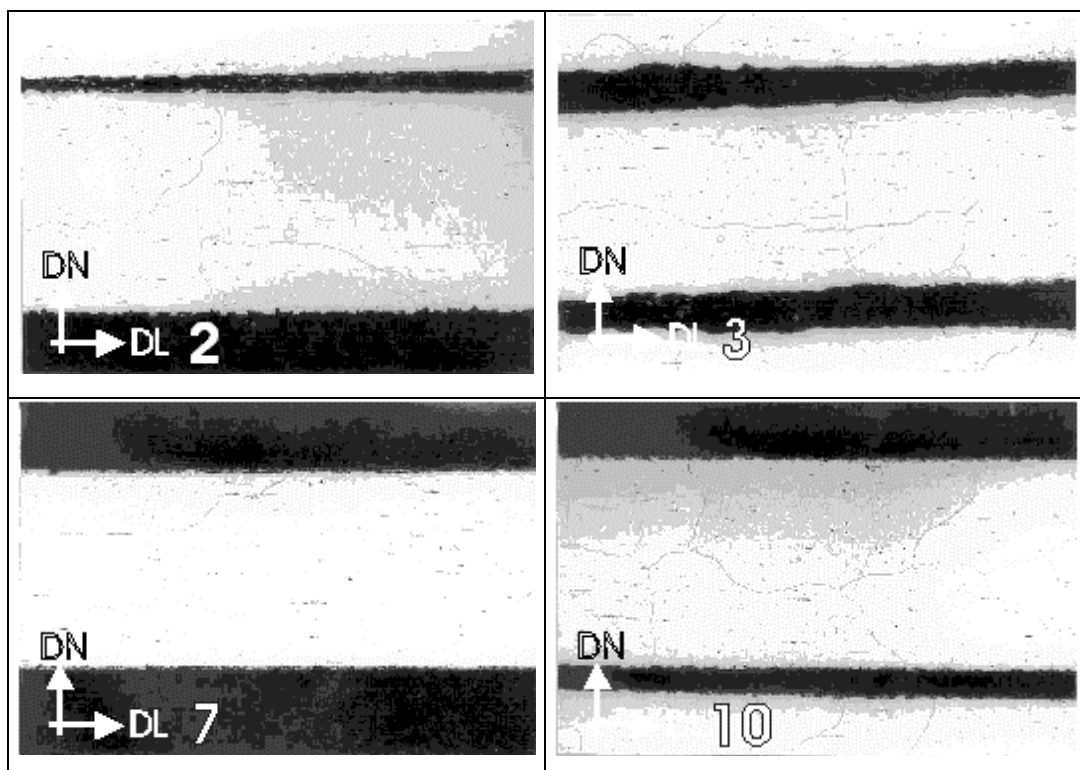


Figura 6 – Evolução microestrutural da BFF (amostras 2, 3, 7 e 10). Aumento: 200x

Novamente apesar da semelhança microestrutural, a textura cristalográfica apresentou uma grande correlação com o tamanho de grão da BQ como pode ser visto na figura 7.

A difração de raios X das amostras de BFF revelou que à medida que se aumenta o tamanho de grão da BQ a textura cristalográfica é otimizada.

A medida do aperfeiçoamento da textura é o aumento da intensidade relativa de planos favoráveis (que contêm a direção de fácil magnetização do Fe- α $\langle 001 \rangle$). A figura 7 mostra que ao contrário da BF que apresenta aumento para

maiores tamanhos de grão da BQ nas intensidades de planos das famílias {110} e {211}, na BFF estes permanecem praticamente constantes.

A intensidade da família {200} cai de modo significativo com o aumento do tamanho de grão da BQ, contudo, após o tamanho de grão de aproximadamente 100µm a intensidade relativa se recupera completamente.

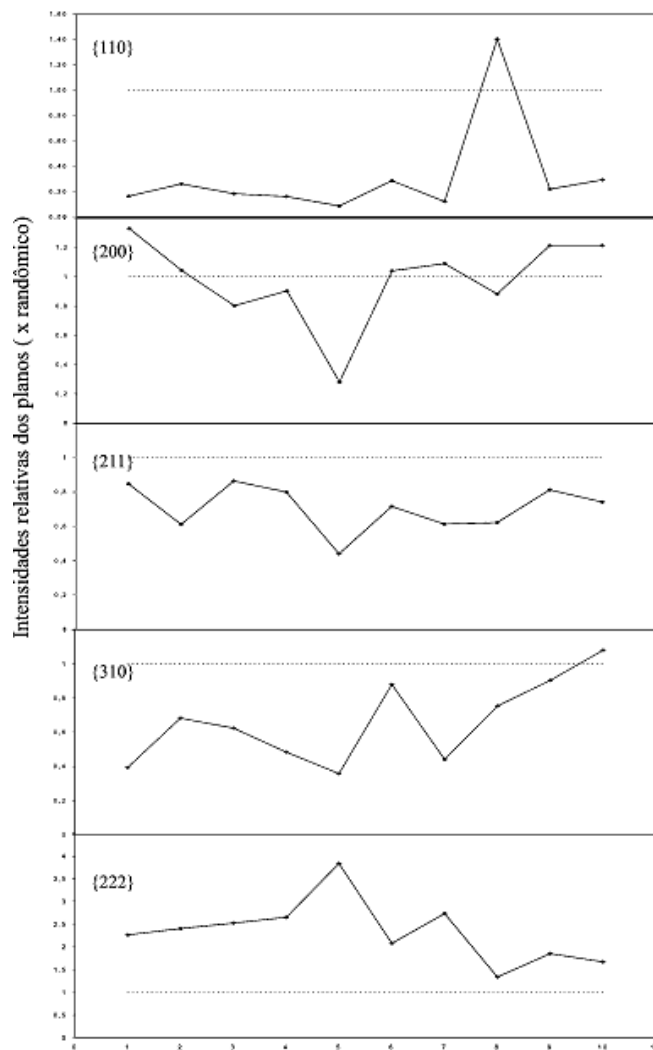


Figura 7 – Influência da variação do tamanho de grão da BQ sobre a textura cristalográfica da BFF. A linha tracejada representa a intensidade aleatória (1x).

Na BFF as grandes alterações cristalográficas observadas foram nas famílias de planos {310} e {222}. Com base nestes comportamentos pode-se afirmar que o aperfeiçoamento da textura cristalográfica com o aumento do tamanho de grão da BQ é atribuído à recuperação da família de planos {310} e a nítida queda da intensidade da família {222} a qual é a mais prejudicial à magnetização.

O comportamento da família de planos $\{222\}$ não concorda inteiramente com os experimentos de YASHIKI;KANEKO ⁽¹⁾ que reportam uma intensidade de $\sim 4x$, por outro lado os resultados aqui apresentados estão em maior concordância com os obtidos por KAWANO, FUJIYAMA e AOKI ⁽⁴⁾ que relatam que a família $\{222\}$ foi completamente suprimida dando lugar aos planos $\{100\}$ ($\sim 2x$), contudo, se analisarmos a figura 7 podemos observar que a concordância não é perfeita pois temos neste trabalho somente a diminuição da família $\{222\}$ (nunca abaixo do valor aleatório) com a manutenção da família $\{100\}$ próxima à intensidade aleatória (1x). A família de planos $\{110\}$ está em perfeita concordância com os resultados de KAWANO; FUJIYAMA;AOKI ⁽⁴⁾.

As figuras de corrosão revelaram as seguintes características:

A maioria dos grãos $\{100\}$ estão alinhados perfeitamente na direção $[110]$, contudo podemos também observar a ocorrência de alinhamento na direção $[100]$ como mostram as figuras 8a e 8b respectivamente. Os grãos com orientação $\{110\}$ estão quase sempre alinhados tanto na direção $[110]$ e $[100]$ indiscriminadamente como pode ser visto nas figuras 8c,8d.

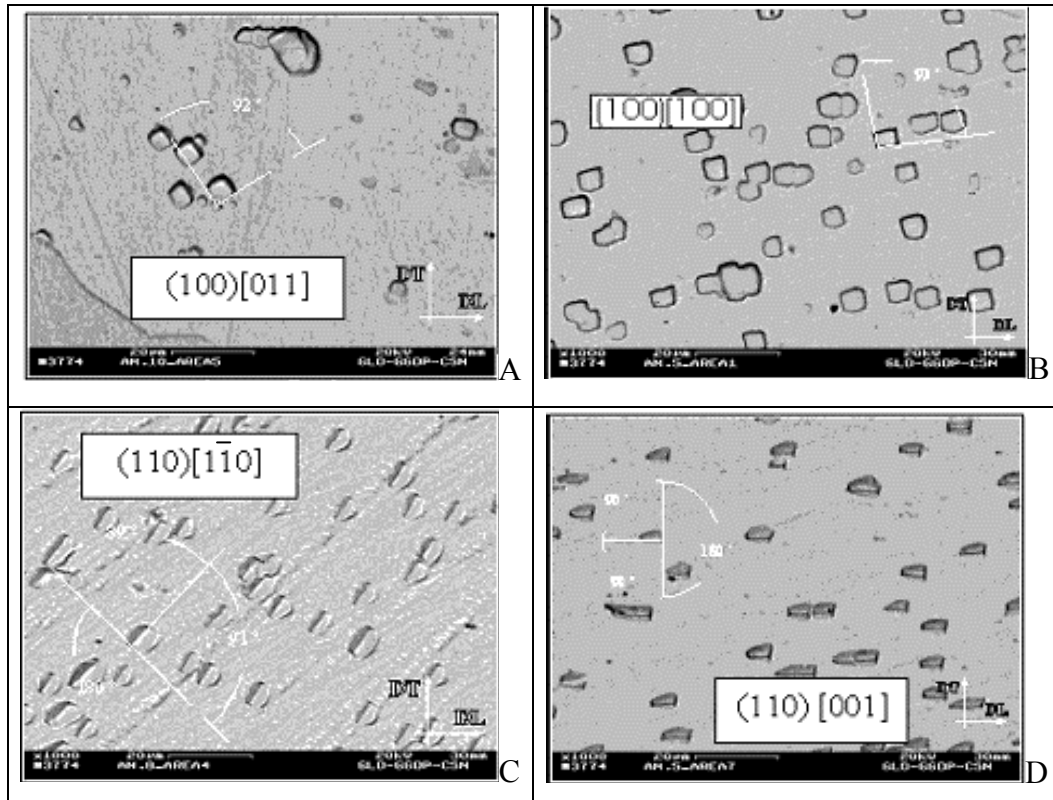


Figura 8 – Figuras de corrosão A,B,C e D. Aumento: 1000x

Não foram observados qualquer tipo de alinhamento preferencial dos grãos com orientações próximas a $\{111\}$ com a direção de laminação como sempre apresentam os grãos com orientações $\{100\}$ e $\{110\}$.

CONCLUSÕES

Com bases nos resultados experimentais podemos tirar as seguintes conclusões:

1. A mudança de textura que ocorre para tempos maiores que 17h na BF, pode estar associada ao desaparecimento dos grãos menores ($\sim 10 \mu\text{m}$) que foram encontrados nas amostras com tempo inferiores a 17h.

2. A intensidade dos planos $\{110\}$ decresce após a laminação a frio e recozimento contínuo. O crescimento de grão favorece o aumento da componente $\{111\}$. Entretanto, tempos mais longos (17h) parecem favorecer um aumento da componente $\{110\}$ em detrimento da $\{111\}$.

3. Para o TGF da BQ $> 100 \mu\text{m}$ a BFF apresenta otimização da textura devido a diminuição da intensidade $\{222\}$, aumento da intensidade $\{310\}$ e de estabilização da intensidade $\{200\}$.

4. As figuras de corrosão revelaram principalmente as orientações $\{100\}\langle 011\rangle$, $\{110\}\langle 001\rangle$ e muitas orientações próximas a $\{111\}$.

AGRADECIMENTOS

M. F. de Campos agradece CNPq-PROMETRO

REFERÊNCIAS

- [1] – YASHIKI, H.; KANEKO, T.. Effect of Hot-Band annealing on anisotropy of magnetic properties in low-Si semi-processed electrical steels. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, v.112, North-Holland, p.200-202, 1992.
- [2] - CAMPOS, M. F. de. Microestrutura, textura e propriedades magnéticas em aços elétricos. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.
- [3] – YASHIKI, H.; OKAMOTO, A.. Effect of hot band grain size on magnetic properties of non-oriented electrical steels. IEEE Transactions on Magnetics, vol.MAG-23, nº 5, September 1987.

- [4] – KAWANO, M.; FUJIYAMA, T.; AOKI, T.. Electrical Steels for High-Functional Automotive Electrical Components Corresponding to Energy Saving. Kawasaki Steel Technical Report, Nº 48, March 2003.
- [5] - HORN, E.; LOTTER, U.. Determining the grain Orientation on the surfaces of electrical sheets by Means of Etch Pits. Part 1: Systematic Approach to interpret SEM micrographs of etch pits for accurate orientation determination and introduction of a macroetching technique for the simple estimation of the orientation. Pract. Met. 22 Germany, p. 397-406, 1985.

EVOLUTION OF THE MICROSTRUCTURE AND TEXTURE IN THE PROCESSING OF HIGH MANGANESE ELECTRICAL STEEL

Augusto César Lacerda de Oliveira^{1,2}

Marcos Flávio de Campos^{3,*}

Nilza Cristina S. B. Zwirman²

Verner Wolgien²

Paulo Rangel Rios¹

*) Inmetro – Prédio 3 / DIMAT. Av. Nossa Senhora das Graças 50 Xerem –
Duque de Caxias RJ, 25250-020

mfcampos@inmetro.gov.br

1) Programa de pós-graduação em Engenharia Metalúrgica – Escola de Engenharia Industrial metalúrgica de Volta Redonda – Universidade Federal Fluminense.

2) Centro de Pesquisas da CSN, Companhia Siderúrgica Nacional.

3) Inmetro – Dimci/Dimat

ABSTRACT

This study is about the effect of an annealing at 600°C on the grain size and texture of a hot band. The annealed hot band was cold rolled (from 2,5 mm to 0,5 mm) followed by a continuous annealing at 780°C, skin pass and final annealing. The texture was determined for all the stages with the Inverse Pole Figure Method and the microtexture was investigated by Etch pits method in final stage. For this steel, 2h (at 600°C) was enough for attaining grain size > 70 μm. However, a time greater than 10h is necessary for producing grain size larger than 100 μm. The hot band grain size greater than 100 μm produces an improvement on texture because the intensity of {222} is decreased, the intensity of {310} is increased and {200} planes intensity is near random.

In the sample that was submitted to a final annealing, Etch pits have revealed the presence of the main orientations: {100}<011>, {110}<001> and several orientations near {111}.

KEY-WORDS: non-oriented electrical steels, texture, grain growth.