

ESTUDO DA LAMINAÇÃO DE ENCRUAMENTO EM AÇOS ELÉTRICOS SEMI-PROCESSADOS: CORRELAÇÃO COM OS FATORES DE TAYLOR ⁽¹⁾

Sérgio Funayama de Castro ⁽²⁾

Juno Gallego ⁽³⁾

Fernando José Gomes Landgraf ⁽⁴⁾

Hans-Jürgen Kestenbach ⁽²⁾

Resumo

Medidas de microdureza foram realizadas grão a grão para estimar o encruamento e, com isto, a energia armazenada em função da orientação cristalográfica de cada grão, determinada pela técnica de EBSD (Electron Back Scattered Diffraction). Foram investigadas amostras de um aço elétrico semi-processado, tanto no seu estado original (chapa a frio com 0,07 %C) como no estado descarbonetado. Uma redução de 6% na espessura foi utilizada para simular a etapa industrial da laminação de encruamento. Os resultados mostraram boa correlação entre a energia armazenada e os fatores de Taylor, diferentemente ao que se encontra na literatura para grandes deformações, onde a correlação é dificultada pela rotação dos grãos durante a deformação.

Palavras-chave: Aços elétricos; Encruamento; Energia armazenada; Orientação cristalográfica.

⁽¹⁾ Trabalho submetido ao 60º Congresso Anual da ABM, 25 a 28 de julho de 2005, Belo Horizonte.

⁽²⁾ Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos.

⁽³⁾ Departamento de Engenharia Mecânica, UNESP - Ilha Solteira.

⁽⁴⁾ Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), São Paulo.

1 INTRODUÇÃO

A laminação de encruamento representa uma etapa importante no processamento dos aços elétricos de grão não orientado [1]. Na prática industrial, pequenas deformações entre 5 e 10% são utilizadas para provocar aumento do tamanho de grão na chapa durante o recozimento final em atmosfera descarbonetante. Além da redução do teor de carbono e do crescimento do grão ferrítico, espera-se um melhoramento da textura, aumentando a componente {100}<0vw> que garantiria que duas direções <010> de fácil magnetização estejam paralelas à superfície da chapa [2].

Neste contexto, ganha importância a energia armazenada durante a laminação de encruamento. Experimentalmente, é bem conhecido que a energia armazenada varia em função da orientação cristalográfica dos grãos [3,4]. De acordo com as teorias de plasticidade, a energia armazenada aumenta com o aumento do fator de Taylor que, por sua vez, depende da orientação cristalográfica do grão em relação à direção da tensão aplicada. Se o crescimento de grão durante o recozimento final for controlado pela energia armazenada, orientações com baixos fatores de Taylor (menor energia armazenada) deveriam dominar a textura da chapa após o recozimento, uma vez que o crescimento de grãos com baixa energia armazenada consumiria os grãos vizinhos de alta energia armazenada.

O fator de Taylor é definido como

$$M = \Sigma \delta \gamma_i / \delta \epsilon \quad (1)$$

onde os $\delta \gamma_i$ representam as parcelas de cisalhamento em cada um dos sistemas de deslizamento, ativados em determinado grão enquanto a amostra recebe uma deformação macroscópica de $\delta \epsilon$ [5]. Nota-se, portanto, que uma determinada deformação macroscópica $\delta \epsilon$ (por exemplo, laminação de encruamento com 6% de redução em espessura) gera uma maior atividade de deslizamento ($\Sigma \delta \gamma_i$) em grãos com maiores valores de M, e uma menor atividade de deslizamento em grãos com menores valores de M.

Tentativas de correlação entre a energia armazenada e os fatores de Taylor em amostras laminadas foram realizadas anteriormente por técnicas de difração [6,7]. No presente trabalho, optou-se por medidas de microdureza que, numa escala relativa, também deveriam indicar o grau de encruamento e com isto a energia armazenada em cada grão. Convém mencionar que este trabalho faz parte de um projeto de pesquisa mais amplo, elaborado para acompanhar a formação de texturas pelo estudo de grãos individuais, determinando orientações cristalográficas pela técnica de EBSD (Electron Back Scattered Diffraction), subestruturas no microscópio eletrônico de transmissão, e energias armazenadas por medidas de microdureza.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O aço elétrico do tipo semi-processado foi fornecido pela empresa Brasmetal, em forma de chapa a frio com 0,63mm de espessura, laminada a frio e recozida a 670°C por 3h a partir de uma chapa a quente com 2mm de espessura, e com composição química mostrada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição Química do Aço Elétrico, em Porcentagem de Peso.

C	Mn	Si	S	P	Al	N
0,07	0,43	0,08	0,011	0,015	0,047	0,0034

Uma vez que, em condições industriais de recozimento, o crescimento de grão poderia começar na camada superficial já descarbonetada, foi aplicado a uma parte do material um tratamento térmico de descarbonetação em atmosfera de 90% N₂ + 10% H₂ com ponto de orvalho 17 °C a 760 °C por 2 horas, com o objetivo de reduzir o teor de carbono até um valor abaixo de 0,005 %C, gerando com isto uma condição diferenciada do material inicial que poderia representar a camada superficial em futuros testes de simulação do recozimento industrial. Em seguida, ambas as amostras, a de alto (0,07 %C) e a de baixo teor de carbono (<0,005 %C), foram laminadas a frio, num passe único com redução de 6% em espessura.

Toda caracterização microestrutural foi realizada em seções longitudinais da chapa laminada. A preparação metalográfica incluiu lixamento (granos 120, 240, 320, 400, 600 e 1200), polimento com alumina 1 μm, polimento final com sílica coloidal e demarcação de áreas específicas para análise por indentações de macrodureza. Após estes cuidados, os mapas de EBSD apresentaram coeficientes de confiança na faixa de 0,65. Os mapas foram gerados num microscópio Philips XL30-FEG com feixe de elétrons formado por emissão de campo, utilizando software TSL com programa OIM Data Collection 3.05. O mesmo pacote OIM-3 (OIM Analysis 3.03) foi empregado para calcular os fatores de Taylor separadamente para cada um dos grãos analisados. Segundo o fabricante, a rotina utilizava o modelo de Taylor do tipo "full constraints", e permitiu-se deslizamento em planos {110}, {112} e {123}. Um teste revelou pequenas variações nos fatores de Taylor se apenas os planos {110} ou os planos {110} + {112} fossem considerados.

Com os mapas de EBSD prontos para cada área demarcada, foi aplicado um ataque leve de nital 3% por 5 segundos, com o objetivo de revelar os contornos de grão para observação no microscópio ótico. Uma carga de 2g foi usada para as medidas de microdureza, realizadas num equipamento Carl Zeiss Jena Neophot 21.

3 RESULTADOS

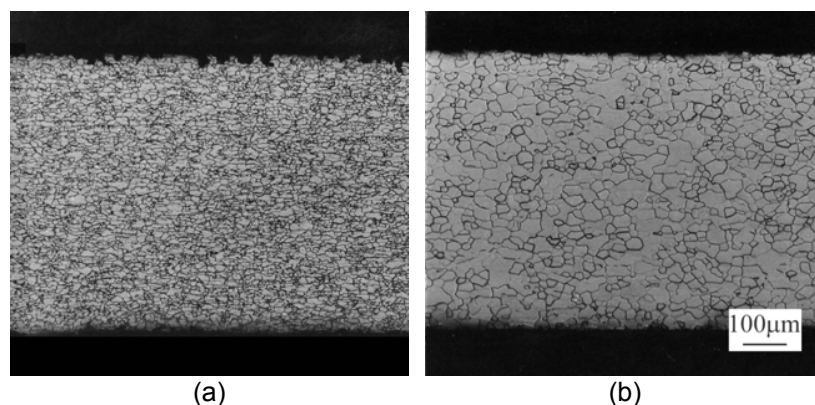


Figura 1. Estrutura de grão antes (a) e depois (b) do tratamento térmico de descarbonetação. Aumento 65 X.

A Figura 1 apresenta a estrutura dos grãos antes e depois do tratamento de descarbonetação. Em relação à microestrutura original da chapa a frio mostrada na Figura 1(a), com tamanho de grão na faixa de ASTM 9.5, houve crescimento de grão até o tamanho ASTM 7 durante o tratamento de descarbonetação, como mostra a Figura 1(b).

Cabe ressaltar que a Figura 1 também serve para mostrar a importância da laminação de encruamento, uma vez que as condições do tratamento de descarbonetação escolhidas neste trabalho eram as mesmas utilizadas no recozimento final durante processamento industrial. Assim, observa-se na Figura 1 que, na ausência da laminação de encruamento, os grãos atingiram um diâmetro médio de $32\ \mu\text{m}$ (equivalente ao ASTM 7), devido ao crescimento normal (uniforme) de grão enquanto, na presença da laminação de encruamento, o mesmo tratamento térmico geraria um diâmetro médio na faixa de 100 a $150\ \mu\text{m}$ [2], devido ao crescimento anormal induzido por deformação.

Não foram observadas mudanças significativas na estrutura de grão após a laminação de encruamento, devido à pequena quantidade de deformação introduzida (apenas 6%), como mostra a Figura 2.

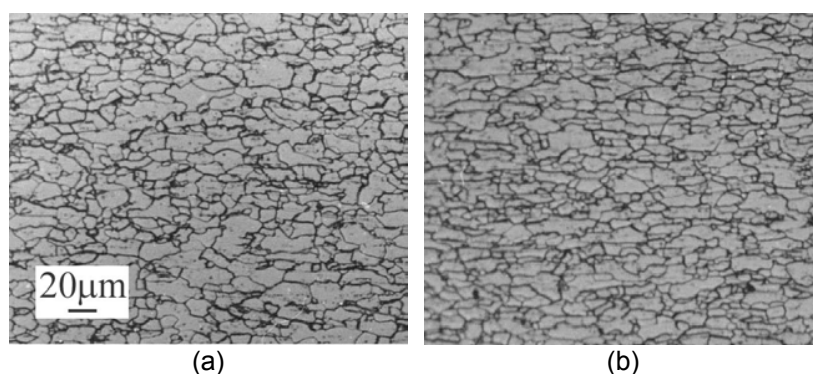


Figura 2. Estrutura de grão do aço original antes (a) e depois (b) da laminação de encruamento. Aumento 210 X.

A Figura 3 apresenta uma comparação entre o mapa EBSD, obtido no microscópio eletrônico de varredura (MEV) a partir de uma amostra apenas polida, e a micrografia comum obtida após ataque metalográfico no microscópio ótico. Como indicado pelo exemplo dos grãos A, B e C, não houve problemas em identificar, no microscópio ótico e para fins das medidas de microdureza, os mesmos grãos cuja orientação cristalográfica tinha sido registrada anteriormente por EBSD.

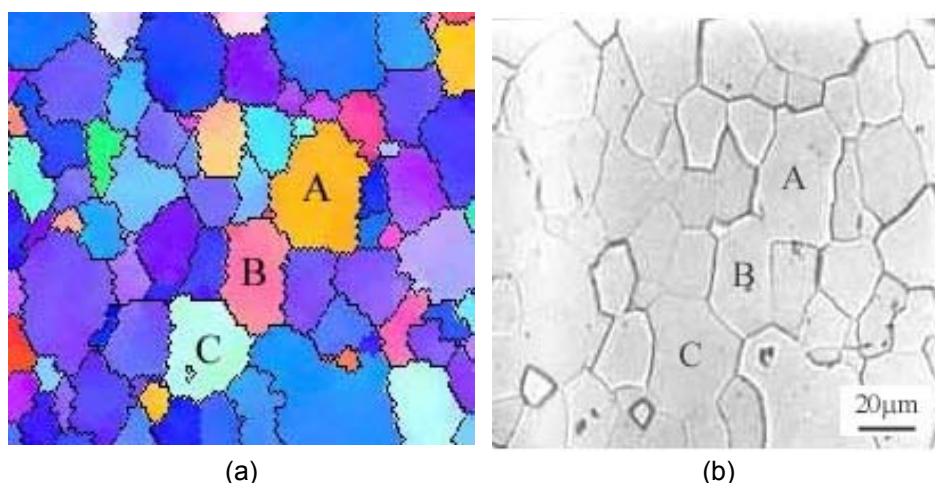


Figura 3. Mesma área incluindo grãos A, B e C, observada por técnicas diferentes em amostra descarbonetada e deformada. EBSD no MEV em (a), metalografia comum no microscópio ótico em (b). Aumento 400 X.

Além do fato bem conhecido que a técnica de EBSD tende a reconhecer contornos de grão adicionais não revelados pela metalografia ótica, convém comentar que as pequenas diferenças em tamanho e/ou formato entre os mesmos grãos nas Figuras 3(a) e 3(b) devem ser atribuídas ao ataque metalográfico adicional (Nital 3% por 5s) utilizado na Figura 3(b).

Dois exemplos das indentações de microdureza são mostrados na Figura 4. Convém mencionar que todas as medidas foram realizadas perto dos centros de grão. Os grãos, porém, foram escolhidos a partir do mapa de EBSD, favorecendo aqueles grãos cuja orientação poderia estar associada com energias armazenadas mais baixas ou mais altas, de acordo com os planos $\{hkl\}$ encontrados paralelos à superfície. De acordo com a literatura, a energia armazenada em aços de baixo carbono varia conforme a seqüência $E_{(110)} > E_{(111)} > E_{(211)} > E_{(100)}$ onde os planos $\{hkl\}$ se referem aos planos de laminação em cada grão [3,4].

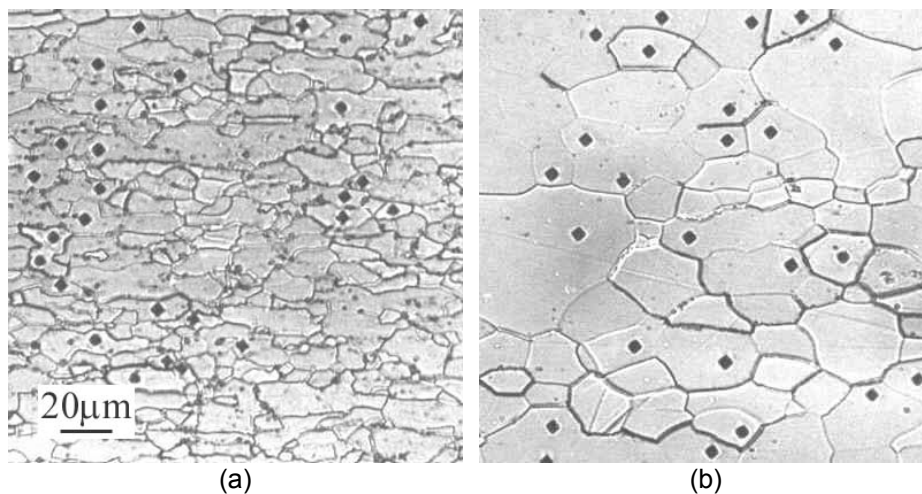


Figura 4. Indentações de microdureza após laminação de encruamento, em grãos com orientação cristalográfica previamente determinada. Aço original em (a), aço descarbonetado em (b). Aumento 360 X.

Os resultados finais deste trabalho aparecem na Figura 5, que apresenta todas as medidas de microdureza plotadas em função dos fatores de Taylor. Apesar da forte dispersão dos dados, aparece de maneira clara o efeito esperado da orientação cristalográfica sobre a dureza das amostras laminadas, com a dureza aumentando proporcionalmente aos fatores de Taylor tanto para o aço original com 0,07 %C na Figura 5(a), como para o aço descarbonetado na Figura 5(b). Na ausência da laminação de encruamento, por outro lado, não foi observado efeito significativo da orientação dos grãos sobre as medidas de dureza, como mostra a Figura 5(c). Isto significa que o aumento da microdureza nas Figuras 5(a) e (b) de fato representa um aumento do nível de encruamento que, por sua vez, deve refletir um aumento da energia armazenada.

Embora algumas medidas de microdureza tivessem sido realizadas na camada superficial das chapas, o número total destas medidas não foi o suficiente (em relação à grande dispersão dos dados) para descobrir um eventual gradiente de dureza entre superfície e centro das amostras deformadas [8].

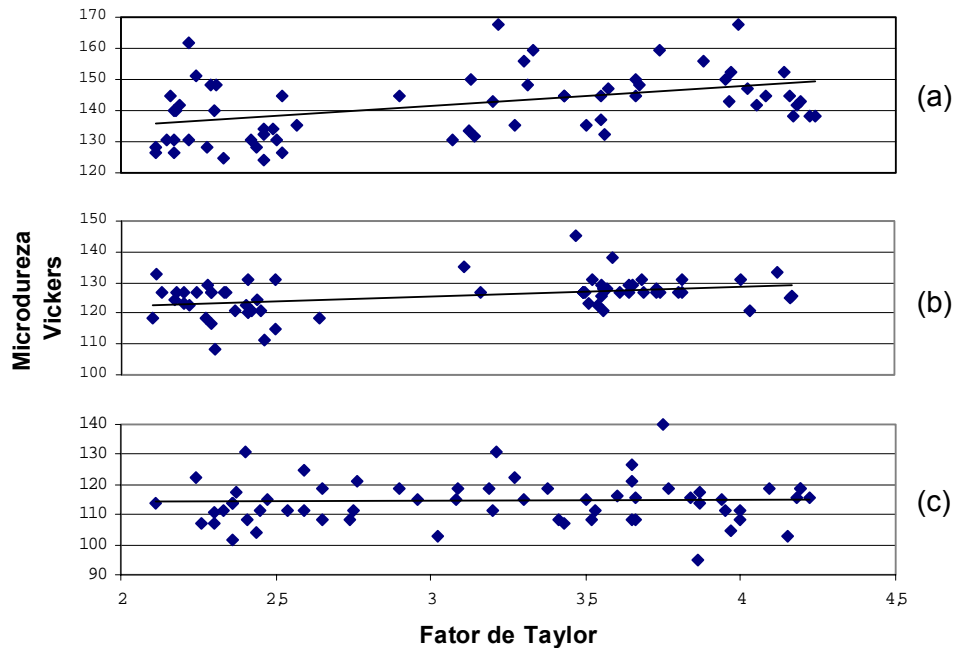


Figura 5. Medidas de microdureza em grãos individuais em função do fator de Taylor. Aços com laminação de encruamento, sem e com descarbonetação prévia, em (a) e (b) respectivamente. Aço original sem laminação de encruamento em (c). As linhas retas representam o ajuste dos dados conforme método dos mínimos quadrados.

4 DISCUSSÃO

Em relação a outras iniciativas relatadas na literatura, com o mesmo objetivo de determinar efeitos da orientação cristalográfica sobre a energia armazenada, o método escolhido no presente trabalho pode ser considerado inovador, além de prometer vantagens significativas. Pela primeira vez, a variação do nível de energia armazenada em grãos individuais foi determinada. Além disto, a importância dos fatores de Taylor ficou mais evidente.

Medidas de dureza não costumam ser usadas para acompanhar o comportamento da energia armazenada (E_A), embora o encruamento devido à deformação plástica (aumento da resistência mecânica devido ao aumento da densidade de discordâncias) representa a mesma base de medida utilizada em outras técnicas experimentais indiretas. Por outro lado, medidas diretas de E_A só podem ser feitas por calorimetria, o que exclui a possibilidade de determinar E_A em função da orientação cristalográfica em policristais.

Não existe teoria que permitiria relacionar as medidas de dureza com valores reais da energia armazenada. Porém, outras técnicas indiretas que permitem esta avaliação (como por exemplo aquelas baseadas em difração) fornecem valores de E_A reconhecidamente baixas, na faixa de 8-80 J/mol, enquanto testes diretos de calorimetria indicam valores na faixa de 250-800 J/mol [9]. Assim, espera-se das medidas de microdureza apenas valores relativos, da mesma maneira como se avaliam os resultados das outras técnicas experimentais com exceção dos ensaios de calorimetria.

Métodos indiretos usados no passado para determinar os efeitos da orientação cristalográfica incluem as técnicas de difração (que medem o alargamento dos picos difratados), além de medidas da densidade de discordâncias no microscópio eletrônico de transmissão. Nos trabalhos mais antigos [3,4], tais medidas ficaram limitadas a algumas orientações específicas apenas,

representando, além disto, apenas valores médios para zonas inteiras de orientação (como, por exemplo, o valor de $E_{(111)}$ que representa a energia armazenada média de todas as orientações com um plano $\{111\}$ paralelo ao plano de laminação). Em trabalhos posteriores, medidas de E_a baseadas nas técnicas de difração de raios-X e de nêutrons já começaram a ser avaliadas em função dos fatores de Taylor [6,7]. No entanto, os resultados não apresentaram uma tendência clara, provavelmente porque foram levantadas em metais fortemente deformados (50% e 80% de redução em espessura, respectivamente), o que deve ter modificado os próprios fatores de Taylor durante a laminação, devido à rotação de muitos grãos rumo a orientações mais estáveis.

No presente trabalho, o efeito dos fatores de Taylor sobre a energia armazenada se apresentou de maneira bem mais nítida, uma vez que a rotação dos grãos pode ser considerada desprezível após deformação plástica de 6% apenas. Isto significa que a utilização dos fatores de Taylor oferece uma ótima ferramenta na tentativa de entender e melhorar a formação da textura final em aços elétricos do tipo semi-processado. De fato, este caminho já foi escolhido por Kestens e colaboradores que encontraram, de acordo com as expectativas, um aumento de orientações com baixos fatores de Taylor após testes de simulação do recozimento final [10].

5 CONCLUSÕES

Medidas de microdureza se revelaram aptas para estimar a energia armazenada em grãos individuais de um aço elétrico após laminação de encruamento. Os resultados justificaram as seguintes conclusões:

- A energia armazenada aumenta com o aumento do fator de Taylor.
- A previsão do comportamento de grãos individuais pelos fatores de Taylor promete ser mais realista no caso de pequenas deformações.

Agracedimentos

Este trabalho contou com o apoio do CNPq em forma de auxílio à pesquisa (Processo 475164/2003-2). SFC também agradece à CAPES pela bolsa de mestrado. Amostras do aço elétrico foram gentilmente fornecidas pela Brasmetal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Cheong, S.W., Hilinski, E.J. e Rollett, A.D., *Metall. Mater. Trans. A*, 2003, v.34A, pp.1311-1319.
2. Landgraf, F.J.G., Takanohashi, R. e Campos, M.F., em Textura e Relações de Orientação, A.P. Tschiptschin et al., eds., EPUSP, São Paulo, 2001, pp.161-188.
3. Dillamore, I.L., Smith, C.J.E. e Watson, T.W., *Met. Sci. J.*, 1967, v.1, pp.49-54.
4. Every, R.L. e Hatherly, M., *Texture*, 1973, v.2, pp.1-12.
5. Viana, C.S.C. e Paula, A.S., em Textura e Relações de Orientação, A.P. Tschiptschin et al., eds., EPUSP, São Paulo, 2001, pp.23-37.
6. Kallend, J.S. e Huang, Y.C., *Met. Sci.*, 1984, v.18, pp.381-385.
7. Rajmohan, N., Hayakawa, Y., Szpunar, J.A. e Root, J.H., *Acta Mater.*, 1997, v.45, pp.2485-2494.
8. Castro, N.A., Landgraf, F.J.G., Tschiptschin, A.P. e Henrique, M.L., Anais do XVI Congresso Brasileiro de Ciência e Engenharia de Materiais (CBECIMAT), Porto Alegre (2004), p.1-11. Em CD-ROM.

9. Campos, M.F., Falleiros, I.G.S. e Landgraf, F.J.G., Anais 59° Congresso Anual da ABM (Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais), São Paulo (2004). Em CD-ROM.
10. Kestens, L., Jonas, J.J., Van Houtte, P. e Aernoudt, E., *Metall. Mater. Trans. A*, 1996, v.27A, pp.2347-2358.

A STUDY OF TEMPER ROLLING IN SEMIPROCESSED ELECTRIC STEEL: CORRELATION WITH TAYLOR FACTORS ⁽¹⁾

Sérgio Funayama de Castro ⁽²⁾

Juno Gallego ⁽³⁾

Fernando José Gomes Landgraf ⁽⁴⁾

Hans-Jürgen Kestenbach ⁽²⁾

Abstract

Microhardness measurements were carried out in individual grains with the aim of estimating the level of work hardening and, therefore, the stored energy as a function of crystallographic orientation, as determined by EBSD (Electron Back Scattered Diffraction). Two different conditions of a commercial semi-processed electric steel were investigated: The original cold-rolled and annealed material with 0.07%C, and an additional sample that had been subjected to a decarburizing heat treatment. A reduction of 6% in thickness was chosen to simulate the industrial step of temper rolling. The results showed a much better correlation between stored energy and Taylor factors than what has previously been reported in the literature. The improvement is thought to be related to the rather small plastic deformation during which grains should not rotate to any significant extent, and therefore the Taylor factors could be considered to remain constant.

Key-words: Electric steels; Work hardening; Stored energy; Crystallographic orientation.

⁽¹⁾ Paper submitted for presentation at the 60th Annual Congress of ABM, Belo Horizonte, MG, July 25-28, 2005.

⁽²⁾ Department of Materials Engineering, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

⁽³⁾ Department of Mechanical Engineering, UNESP - Ilha Solteira.

⁽⁴⁾ Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), São Paulo, SP.