

LAMINAÇÃO FERRÍTICA DE TIRAS A QUENTE ¹

Antonio Augusto Gorni ²
Marcos Roberto Soares da Silva ³
José Herbert Dolabela da Silveira ⁴

Resumo

Tradicionalmente a laminação de tiras a quente de aços com baixo carbono deve terminar imediatamente acima da chamada temperatura Ar_3 , situação em que a microestrutura ainda está plenamente austenítica mas pronta a iniciar sua transformação em ferrita com tamanho de grão refinado durante o resfriamento posterior. Contudo, uma laminação efetuada sob temperaturas significativamente inferiores, já no campo ferrítico, pode proporcionar características muito interessantes para alguns tipos de produtos, como aços para uso elétrico e os isentos de intersticiais (IF). Surpreendentemente, esse processo permite obter valores de carga de laminação iguais ou mesmo inferiores aos observados na prática convencional. Este trabalho mostra os resultados obtidos nas primeiras laminações ferríticas de tiras a quente feitas na COSIPA. O desempenho operacional observado foi muito bom, comprovando a viabilidade desse novo processo, tanto em termos do nível de solicitação do equipamento como da planicidade da tira a quente. Isto abre o caminho para novos desenvolvimentos, como a laminação de aços isentos de intersticiais no campo ferrítico, rota de produção que pode reduzir o custo de fabricação e melhorar o desempenho desse produto nos clientes.

Palavras-Chave: Laminação de Tiras a Quente, Laminação Ferrítica, Resistência à Deformação a Quente

¹ Trabalho a ser apresentado ao 41º Seminário de Laminação - Processos e Produtos Laminados e Revestidos, Joinville (SC), 26 a 28 de Outubro de 2004.

² Membro da ABM. Engenheiro de Materiais, M. Eng, Dr. Eng., Analista de Processos da Gerência de Suporte Técnico da Laminação a Quente, Companhia Siderúrgica Paulista – COSIPA, Cubatão SP. E-Mail: gorni@cosipa.com.br

³ Membro da ABM. Engenheiro Metalurgista, Analista de Processos da Gerência de Suporte Técnico da Laminação a Quente, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP. E-Mail: marcossilva@cosipa.com.br

⁴ Membro da ABM. Engenheiro Metalurgista, M.Eng., Gerente de Suporte Técnico da Laminação a Quente, Companhia Siderúrgica Paulista – COSIPA, Cubatão SP. E-Mail: herbert@cosipa.com.br

- Introdução

A temperatura de acabamento ou final de laminação é um fator de grande importância na definição das características que os produtos planos laminados a quente irão apresentar. De fato, a prática convencional da laminação de tiras a quente de aços ao carbono tem demonstrado que a utilização de uma temperatura de acabamento imediatamente acima do ponto onde ocorre o início da transformação austenita → ferrita (ou seja, a chamada temperatura Ar_3) proporciona máximo refino de grão ao material, característica microestrutural que maximiza a resistência mecânica, tenacidade e conformabilidade do laminado plano [1].

Caso a temperatura de acabamento estiver não muito abaixo de Ar_3 a microestrutura final poderá ficar bastante heterogênea, particularmente se a temperatura de bobinamento for alta. Isso ocorre em função de um exagerado crescimento de grão induzido por deformação que pode ocorrer nos grãos da ferrita formada antes da deformação. Esse fenômeno microestrutural possui efeitos deletérios no material, sendo uma das causas do chamado defeito “quebra de superfície” que ocorre em chapas de aço estampadas [1,2]. Também podem aparecer sérios problemas operacionais, uma vez que nessa faixa de temperaturas a ferrita formada apresenta resistência a quente bem menor do que a austenita que lhe deu origem, uma vez que aquela forma alotrópica do ferro apresenta maior número de sistemas de escorregamento. A recalescência que acompanha essa reação tende a realçar esse efeito [3-5]. Esse súbito amaciamento do material, que se inicia em suas porções mais frias, pode perturbar severamente o sistema de controle nas últimas cadeiras do trem acabador do LTQ, inviabilizando o balanço de massa e o correto tensionamento do material que passa entre elas. O resultado dessa perturbação é a interrupção inesperada da laminação desse material e seu conseqüente sucateamento [5].

Por outro lado, esses inconvenientes podem ser minimizados abaixando-se a temperatura de acabamento até valores mais próximos do ponto onde termina a transformação ferrítica (o chamado ponto Ar_1) e aplicando-se um esquema de passes e refrigeração que promovam a ocorrência da maior parte da transformação ferrítica antes da passagem do material pelas últimas cadeiras do Trem Acabador. Dessa forma é possível laminar o material sob temperaturas relativamente baixas, entre 800 e 900°C, mas mantendo valores de carga de laminação similares ou até menores em relação aos que seriam obtidos em laminação similar entre 900 e 1000°C [5].

Este tipo de tratamento termomecânico apresenta vantagens metalúrgicas no caso de produtos específicos. Por exemplo, no caso de aços elétricos, a laminação do material já em estado totalmente ferrítico evita formação de tensões associadas à transformação austenita → ferrita, permitindo dessa forma o fortalecimento de textura cristalográfica mais favorável à redução das perdas eletromagnéticas do material [6]. Já para aços IF a laminação ferrítica pode maximizar a textura cristalográfica favorável à estampabilidade do material, ou seja, predominância de planos {111} e aumento da taxa entre as intensidades de textura (111)/(001); em certos casos pode-se até suprimir a laminação a frio do material [7,8]. Além dessas vantagens em termos do produto fabricado, a laminação ferrítica também pode proporcionar vantagens operacionais, embora hajam diversos aspectos a serem considerados e equacionados para que seja plenamente viabilizado.

As menores temperaturas de laminação permitem redução na temperatura de reaquecimento das placas, medida que proporciona uma diminuição no consumo de combustíveis entre 13 a 25%, além de queda de 33% na geração de carepa [2,5,9]. Além disso, a intensidade do desgaste nos cilindros de trabalho é menor, resultando em campanhas de 20% a 50% mais prolongadas, conforme o tipo de cilindro e cadeira [10]. As menores temperaturas de acabamento, entre 800 e 850°C, reduzem a vazão de água que se faz necessária para resfriar a tira até a temperatura de bobinamento. Os benefícios da laminação ferrítica se estendem além do âmbito da laminação a quente: o maior tamanho de grão do material assim processado reduz sua resistência mecânica, resultando em cargas na laminação de tiras a frio cerca de 15 a 20% menores que as observadas com materiais similares processados da maneira convencional [5,11].

Por outro lado, a laminação ferrítica apresenta alguns inconvenientes a serem resolvidos. Um deles é o ajuste na temperatura do forno de reaquecimento de placas, o qual demanda muito tempo e provoca grande queda na produtividade da linha a cada vez que ele tem de ser feito. Por esse motivo deve-se minimizar a ocorrência dessas manobras, o que é conseguido através da maximização dos tamanhos dos lotes de material a ser processado por laminação ferrítica. Isto torna menos flexível a programação da produção desse material. Por sua vez, a redução na temperatura de reaquecimento das placas aumenta a carga de laminação nos laminadores esboçadores, os quais processam o aço ainda na fase austenítica. Isso eleva o seu torque RMS, requerendo diminuição no ritmo de produção da linha para não se superaquecer em demasia os motores desses laminadores. Uma alternativa pode ser a manutenção ou então um leve abaixamento da temperatura de reaquecimento das placas destinadas à laminação ferrítica; neste caso a velocidade de laminação deve ser diminuída e/ou o esboço deve ser submetido a resfriamento forçado na entrada do Trem Acabador do LTQ [12]. Neste caso, contudo, perdem-se as vantagens associadas ao uso de menores temperaturas de reaquecimento da placa, além de haver chance de ocorrer quebra de produtividade em função do prolongamento do período de espera a que o esboço seria submetido na entrada do Trem Acabador [5,11].

No caso da laminação ferrítica de aços IF é fundamental que ocorra lubrificação durante a passagem do material pelo Trem Acabador. Ela é necessária a fim de se evitar a formação de uma textura cristalográfica (110) de cisalhamento na superfície do material e que é deletéria à estampabilidade do material, particularmente quando sua espessura é muito fina [7]. Essa medida apresenta vantagens adicionais do ponto de vista operacional, como alguma redução nas cargas de laminação e aumento na qualidade superficial do produto [5].

- Procedimento Experimental

A oportunidade para se introduzir a laminação ferrítica no Laminador de Tiras a Quente da COSIPA surgiu com os primeiros testes de produção de um aço elétrico de grão não-orientado. Suas faixas de composição química são: C \leq 0,006%; 0,4-0,6% Mn; 0,7-0,9% Si; 0,4-0,6% Al e 0,020 e 0,040% Sb.

A temperatura Ar₃ dessa liga, medida através de ensaios de dilatométrica em amostras não-deformadas, é da ordem de 955°C. Estima-se que na prática industrial da laminação de tiras a quente essa temperatura seja elevada de 30°C em função da

perda de temperabilidade do material proporcionada pela deformação. Esse fato explica por que a laminação a quente desse material é problemática quando submetido à temperaturas de acabamento entre 850 e 900°C, ocasião em que se verifica descontrole no fluxo de massa do laminado nas últimas cadeiras do Trem Acabador. O problema é resolvido processando-se esse material através de laminação ferrítica, quando a temperatura de acabamento passa a variar entre 800 e 820°C.

As dimensões das placas processadas nessa primeira oportunidade foram 210 x 1170 x 5200 mm. Uma vez que o volume de produção desse material ainda é pequeno optou-se por efetuar apenas uma pequena redução na temperatura de reaquecimento das placas, que passou de 1250°C até 1200°C. Para que o esboço precisasse passar por um período mínimo de espera na entrada do Trem Acabador, todos os passes de esboçamento foram aplicados sob menor velocidade e incluíram o uso dos jatos de descamação; a espessura final de esboçamento foi a menor possível, da ordem de 28 mm. A bobina a quente apresentava espessura de 2,30 mm e largura de 1025 mm, tendo temperatura de acabamento objetivada de 820°C e bobinamento de 700°C. Os principais parâmetros da laminação ferrítica foram registrados pelo sistema automatizado de coleta de dados.

Também foram realizados acompanhamentos similares de bobinas selecionadas de aço ao C comum, processadas de forma convencional, que apresentavam dimensões semelhantes às de aço elétrico. Isto foi feito para se estabelecer uma comparação entre os processos convencional e ferrítico. A faixa de composição química desses aços ao C foi 0,10-0,14% C, 0,40-0,50% Mn e 0,020-0,050% Al.

O cálculo da resistência à deformação a quente para os dois materiais estudados foi feito baseando-se no procedimento descrito em [13], de acordo com a seguinte seqüência: 1) correção do valor da abertura entre os cilindros em função da cedagem da cadeira e do achatamento dos cilindros; 2) compensação de penetração incompleta da deformação em passes pesados; 3) cálculo do grau e velocidade de deformação; 4) cálculo da temperatura média do esboço, levando em conta a existência de um perfil térmico ao longo de sua espessura; 5) cálculo do valor de resistência à deformação a quente a partir da carga, usando o modelo de Sims de maneira reversa.

Para se neutralizar o efeito dos diferentes graus e velocidades de deformação aplicados pelas várias cadeiras do trem acabador os valores de resistência à deformação a quente obtidos conforme o procedimento descrito no parágrafo anterior foram corrigidos através da seguinte fórmula, baseada na equação de Misaka [14]:

$$\sigma_{aj} = \sigma_{calc} \left(\frac{0,4}{\varepsilon} \right)^{0,21} \left(\frac{5,0}{\varepsilon'} \right)^{0,13}$$

onde σ_{aj} é o valor normalizado da resistência à deformação a quente, σ_{calc} é o valor de resistência à deformação a quente calculado a partir dos parâmetros de laminação, ε é a deformação verdadeira e ε' é a taxa de deformação aplicada no passe em questão.

Foi efetuada a caracterização microestrutural e mecânica a partir de corpos de prova extraídos em três pontos ao longo da largura (bordas e centro) de uma amostra extraída de uma bobina a quente de aço elétrico para se verificar o grau de homogeneidade conseguido no material.

- Resultados e Discussão

O processamento de aço elétrico através da laminação ferrítica especificada no item anterior foi efetuado com sucesso, com os parâmetros de processo mantendo-se dentro dos limites permissíveis do equipamento e obtendo-se planicidade satisfatória da tira. O único problema observado foi a baixa produtividade do processo em função da necessidade de se respeitar um prolongado período de espera para cada esboço até que o mesmo atingisse a temperatura adequada para início da laminação de acabamento. Esta é uma pendência a ser analisada com mais cuidado no futuro, quando o volume de produção deste tipo de material aumentar.

A figura 1 permite que se faça uma comparação entre os valores de resistência à deformação a quente normalizada em função da temperatura para bobinas a quente do aço elétrico aqui estudado e aço ao C comum, considerando-se a laminação de produtos com dimensões similares. Pode-se observar que a resistência à deformação a quente elevou-se significativamente ao se abaixar a temperatura desde 950 até 915°C. Contudo, na faixa de temperaturas entre 915 e 815°C, o valor desse parâmetro se estabilizou ou até mesmo caiu em função da transformação da austenita em ferrita. Dessa forma ficou cabalmente demonstrado o amaciamento causado por essa transformação alotrópica, o qual viabiliza a laminação ferrítica.

A figura 2 mostra que os valores médios de resistência à deformação a quente, carga e potência por passe de laminação são bastante similares para os dois aços considerados, apesar do fato de o aço elétrico estar sendo laminado sob temperaturas 70 a 110°C inferiores ao aço ao C, dentro do especificado pela laminação ferrítica.

A figura 3 mostra a microestrutura de uma chapa de aço elétrico laminada a quente conforme as condições de processo aqui descritas. A morfologia vista nessa figura foi semelhante à observada em todos os pontos ao longo da largura da tira (operação, centro e motor), a qual se mostra um tanto quanto diferente das observadas nos laminados a quente de aços convencionais de baixo C. A periferia da tira apresentou microestrutura com grãos recristalizados equiaxiais. Contudo, à medida em que se desloca para o núcleo da chapa, a microestrutura apresentou progressivo grau de encruamento, com grãos cada vez mais alongados. Em sua região central os grãos apresentam-se predominantemente alongados, com alguns se mostrando isolados e totalmente recristalizados.

Essa microestrutura é típica de aços elétricos laminados no campo ferrítico [6]. A diferença da morfologia entre superfície e núcleo da tira pode ser explicada pela heterogeneidade do grau de deformação aplicado ao longo da espessura da tira. Esse grau é maior na região periférica da tira, aumentando seu grau de encruamento e potencial termodinâmico, favorecendo portanto a recristalização posterior da ferrita após a laminação a quente. Já no centro, onde o grau de deformação aplicado é proporcionalmente menor, a recristalização tende a não ocorrer, uma vez que o potencial termodinâmico provavelmente não atinge magnitude suficiente para deflagrar os processos de recristalização no material.

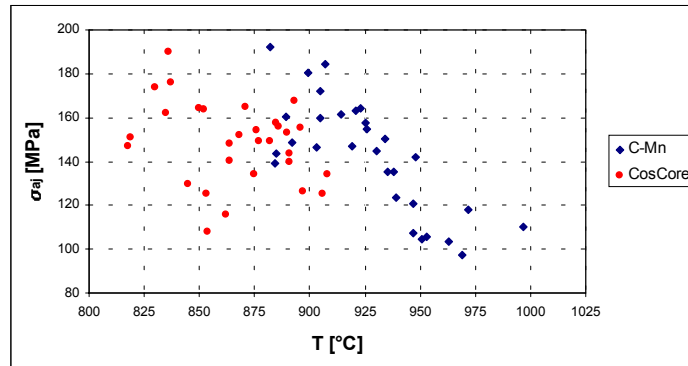


Figura 1: Valores normalizados de resistência à deformação a quente obtidos durante o processamento no Trem Acabador de aços ao C pelo processo convencional sob altas temperaturas e de aços elétricos usando-se a laminação ferrítica sob baixas temperaturas.

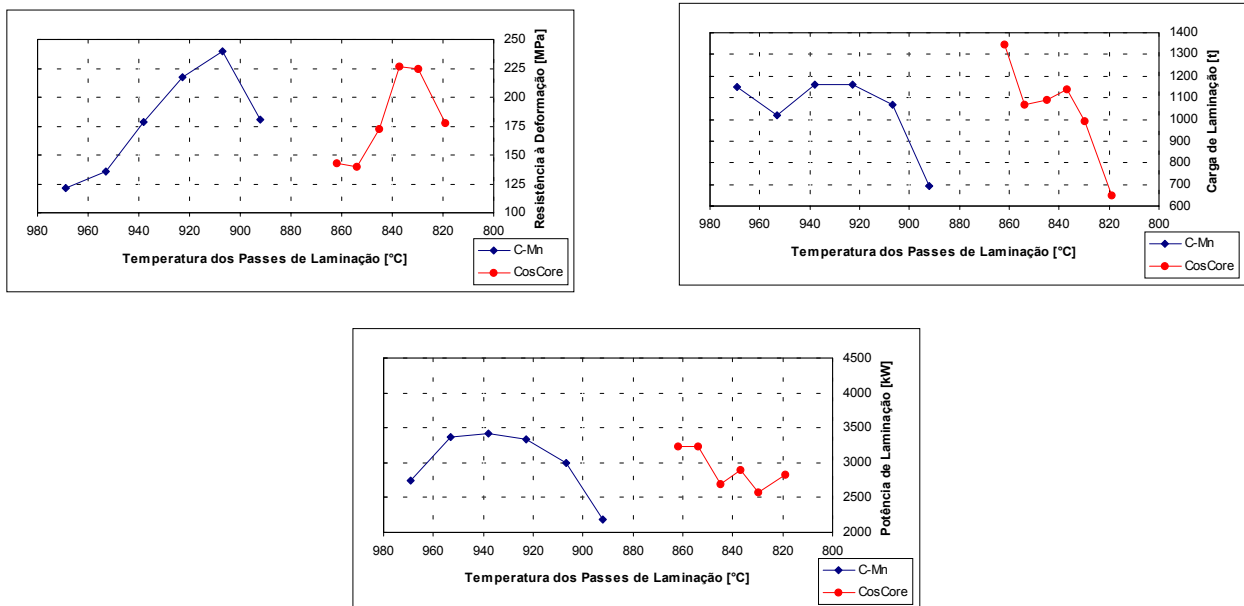


Figura 2: Valores médios de resistência à deformação, carga e potência de laminação verificados durante o processamento de aços ao C e elétricos no Laminador de Tiras a Quente.



Figura 3: Microestrutura de bobina a quente de aço elétrico submetida a temperatura de acabamento de 845°C e bobinamento de 640°C. Ataque de Nital 3%, aumento de 250 x.

A tabela 1 mostra os resultados de ensaios de tração efetuados em amostras de aço elétrico extraídas nas duas bordas e no centro da largura da tira a quente. Os níveis de variação observados para os limites de escoamento e de resistência, alongamento total e dureza Rockwell B foram significativamente altos ao longo da largura em relação aos geralmente observados para aços ao C. Os valores de resistência mecânica e dureza foram maiores no lado operação correspondendo ainda, como já seria de se esperar, os menores valores de ductilidade. As significativas diferenças observadas entre as características mecânicas das duas bordas longitudinais do material pode ser atribuída ao grande intervalo de desenformamento observado entre a placa que deu origem à tira a quente aqui analisada e a anterior, que foi igual a 27 minutos. Isso certamente contribuiu um resfriamento mais intenso da borda longitudinal no lado operação da placa, uma vez que ela ficou exposta à infiltração do ar atmosférico pela porta de saída do forno de reaquecimento de placas ao longo de um período de tempo significativo. Essa menor temperatura de saída do forno deve ter contribuído para um maior refino microestrutural e uma conseqüente elevação da resistência mecânica nessa região, conforme mostrado pelos resultados do ensaio de tração.

| | LE [MPa] | LR [MPa] | AT [%] | HRB (inferior) | HRB (superior) |
|-----------------|-------------|-------------|-----------|-------------------|-------------------|
| Lado Operação | 486 | 544 | 16 | 79 | 85 |
| Centro | 429 | 513 | 19 | 76 | 80 |
| Lado Motor | 400 | 490 | 22 | 72 | 78 |
| Δ máximo | 86 (22%) | 54 (11%) | 6 (38%) | 7 (10%) | 7 (9%) |

Tabela I: Resultados de resistência mecânica e ductilidade ao longo da largura de chapa de aço elétrico laminado a quente. Mesmo material da figura 3.

- Conclusões

Os resultados obtidos demonstram a plena viabilidade da aplicação da laminação ferrítica no Laminador de Tiras a Quente da COSIPA desde que a temperatura de acabamento não seja inferior a 800°C para o caso específico bobinas de aço elétrico com largura de 1200 mm. Os parâmetros do processo de laminação mantiveram-se dentro dos limites operacionais do equipamento apesar do uso de temperaturas de acabamento significativamente mais baixas que o usual,.

Esses bons resultados abrem caminho para a adoção da laminação ferrítica no processamento de aços livres de intersticiais (IF). Note-se que a composição química destes aços é bem similar à do aço elétrico estudado neste trabalho, com exceção do teor de Si, que no caso dos aços IF deverá ser nulo, e da presença de micro-adições de Ti neste produto. Contudo, a largura das bobinas a quente de aços IF é bem maior, podendo atingir valores próximos dos 1500 mm, o que implicará num aumento das cargas e potências de laminação em relação ao que foi observado nesta oportunidade. Este aspecto deverá ser adequadamente considerado quando da adoção da laminação ferrítica, bem como seu efeito sobre o processamento posterior do material no Laminador de Tiras a Frio e Recozimento em Caixa.

Por outro lado, a impossibilidade do abaixamento na temperatura de reaquecimento das placas na execução das experiências descritas neste trabalho comprometeu o ritmo produtivo da linha, o que teve como efeito colateral o surgimento de uma acentuada heterogeneidade nas características microestruturais e mecânicas do material ao longo de sua largura. Esse aspecto terá de ser melhor resolvido no futuro.

- Bibliografia

1. KIM, GYOSUNG & KWON, O. Formation of Abnormally Coarse Grain Structure in Hot-Rolled Strips. In: Thermec '88. **Proceedings**. The Iron and Steel Institute of Japan, Tokyo, 1988, 668-675.
2. GHOSH, S. e outros. Recent Developments in Thermomechanical Controlled Processing for Producing Low Cost Hot Rolled Coils. In: Flat Rolled Products Conference. **Proceedings**. The South East Asia Iron and Steel Institute, Seoul, 1997, Session 18, 2/1-2/15.
3. BLECK, W. e outros. Effect of Temperature Sequence during Hot Strip Rolling on Structure and Properties of Mild Steels. **Steel Research**, August 1993, 396-400.
4. LORENZ, U. e outros. Einfluß einer Umformung im Zweiphasengebiet $\gamma+\alpha$ auf die Werkstoffeigenschaften und die Prozesstechnologie vom dünnem Warmband. **Stahl und Eisen**, 14 November 2002, 111-118.

5. GHOSH, S. & BOWNESS, M.M. Production of Thin Strip through a Conventional Hot Strip Mill. **Steel World**, 1, 2000, 54-59.
6. HULKA, K. The Role of Niobium as Microalloy in Electrical Sheet. CBMM Technical Report, 2001 (cópia obtida em 05.08.2003 a partir do endereço http://www.cbmm.com.br/portug/sources/techlib/report/novos/pdfs/the_role_of.pdf).
7. DEGNER, M. e outros. Entwicklungen bei der Warmumformung im Ferritgebiet. **Stahl und Eisen**, 15 April 2002, 59-62.
8. BODIN, A. e outros. Texture and Microstructure Development during Intercritical Rolling of Low-Carbon Steels. **Metallurgical and Materials Transactions A**, June 2002, 1589-1603.
9. PARKS, W.H. e outros. Ferritic Rolling of Interstitial-Free Steel. **Iron and Steel Engineer**, October 1997, 35-36.
10. STEINIER, D. e outros. Amélioration des Performances des Cylindres HSS en Laminage Ferritique. In: Journées Siderurgiques Internationales d'ATS. **Proceedings**. Association Technique de la Siderurgie Française, Paris, Decembre 2001.
11. HERMAN, J.C. & LEROY, V. New Possibilities of the Ferritic Hot Rolling Applied to Low Carbon Steels. In: TechCo-29. **Proceedings**. Committee on Technology of the International Iron and Steel Institute, Seoul, May 1997.
12. AYLEN, J. Where did Generation V Strip Mills Come From? **Steel Times**, July/August 2001, 225-234.
13. MACCAGNO, T.M. e outros. Determination of Recrystallization Stop Temperature from Rolling Mill Logs and Comparison with Laboratory Simulation Results. **ISIJ International**, November 1994, 917-922.
14. MINAMI, K. e outros. Mathematical Modeling of Mean Flow Stress during the Hot Strip Rolling of Nb Steels. **ISIJ International**, December 1996, 1507-1515.

FERRITIC ROLLING OF HOT STRIP ¹

Antonio Augusto Gorni ²

Marcos Roberto Soares da Silva ³

José Herbert Dolabela da Silveira ⁴

Abstract

Normally the hot strip rolling of low C steels must finish immediately above the A_{r3} temperature, when strip microstructure still is fully austenitic but ready to start its transformation into ferrite with a fine grain size during the subsequent cooling. However, rolling under significantly lower temperatures in the ferritic range, can bring very interesting properties for specific kind of products, like electrical and IF steels. This work shows the results got during the first trials of ferritic hot strip rolling at COSIPA. The operational performance observed was quite good, comproving that this new process is feasible there regarding mechanical loading and product flatness. This achievement opens way for new developments, like the ferritic rolling of IF steels, a route that can lower the production costs and improve its performance at the customers.

Palavras-Chave: Hot Strip Rolling, Ferritic Rolling, Hot Strength

¹ Paper to be presented at the 41th Rolling Seminar – Processes, Rolled and Coated Products, Joinville (Brazil), October 26 to 28, 2004.

² ABM Member. Materials Engineer, M. Eng, Dr. Eng., Process Analyst of the Hot Rolling Technical Support Department, Companhia Siderúrgica Paulista – COSIPA, Cubatão SP. E-Mail: gorni@cosipa.com.br

³ ABM Member. Metallurgical Engineer, Process Analyst of the Hot Rolling Technical Support Department, Companhia Siderúrgica Paulista – COSIPA, Cubatão SP. E-Mail: marcossilva@cosipa.com.br

⁴ ABM Member, Metallurgical Engineer, M.Eng., Chief of the Hot Rolling Technical Support Department, Companhia Siderúrgica Paulista – COSIPA, Cubatão SP. E-Mail: herbert@cosipa.com.br