

O EFEITO DO BORO NA RESISTÊNCIA À DEFORMAÇÃO A QUENTE DE AÇOS COM BAIXO CARBONO ¹

Antonio Augusto Gorni²

José Herbert Dolabela da Silveira³

Pedro Segundo da Silva Vallim⁴

Resumo

A equação para cálculo da resistência à deformação a quente usada no sistema de automação do laminador de tiras a quente da COSIPA não leva em conta o possível efeito do boro sobre esse parâmetro, já que há poucas e contraditórias informações disponíveis na literatura sobre tal efeito. Contudo, surgiram evidências do efeito endurecedor do boro durante a prática operacional, especialmente no caso de materiais processados sob temperaturas de acabamento relativamente baixas. Este trabalho teve como objetivo determinar o real efeito do boro sobre a resistência à deformação a quente durante a laminação de tiras a quente de aços ao carbono, a partir de dados coletados no processo industrial. Os resultados obtidos em termos operacionais confirmaram um discreto efeito endurecedor na austenita proporcionado por teores de 0,001% até 0,007% de boro, o qual foi da ordem de 11 a 15% para temperaturas de laminação abaixo de 910°C. Já o ajuste do modelo de Shida aos dados deste trabalho indicou que o aumento na resistência à deformação a quente é proporcional ao teor de boro e inversamente proporcional à temperatura, podendo chegar a 30% no caso de aços com 0,007% de boro deformados a 875°C.

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

¹ Trabalho a ser apresentado ao 42º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, Santos (SP), 25 a 28 de Outubro de 2005.

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

⁴ Membro da ABM. Engenheiro Metalurgista, C.Q.E., Analista de Processos da Gerência de Suporte Técnico da Laminação a Quente, Companhia Siderúrgica Paulista – COSIPA, Cubatão SP. E-Mail: pedrovallin@cosipa.com.br

- Introdução

A resistência à deformação a quente é um dado fundamental para o cálculo da carga de laminação, parâmetro que, por sua vez, é necessário para a determinação do esquema de passes a ser aplicado num laminador de tiras a quente. O modelo para cálculo da resistência à deformação a quente usado dentro do sistema de automação dessas linhas industriais tem de levar em conta não só os parâmetros do processo, como temperatura, grau e velocidade de deformação, como também a composição química do aço.

Os efeitos dos elementos de liga presentes nos aços de baixo carbono sobre a resistência à deformação a quente já foram pesquisados em diversos trabalhos [1-5], mas no caso específico do boro as informações disponíveis são praticamente inexistentes. Um dos poucos artigos disponíveis mostrou que a adição de 0,0033% desse elemento a um aço com 0,03% C, 1,55% Mn, 0,19% Si, 0,020% Al, 0,020% Ti e 0,0048% N levou a um ligeiro retardamento na recristalização estática da austenita entre dois passes de compressão a quente aplicados a 1000°C com grau de deformação real igual a 0,25 e velocidade de deformação igual a 1 s^{-1} : o tempo de incubação para início da recristalização elevou-se de 0,35 s para 0,45 s, enquanto que o tempo para a obtenção de 50% de recristalização subiu de 0,45 para 1,65 s. Esse efeito foi muito mais pronunciado quando o boro foi adicionado a uma liga-base similar, mas microligada com 0,055% de nióbio, quando o tempo de incubação passou de 5 s para 12 s e o tempo para 50% de recristalização elevou-se de 38 s para 98 s [6].

Ensaio de compressão a quente feitos em aços IF com teores de boro desde zero até 0,0024% confirmaram o efeito endurecedor muito pequeno desse elemento sob as seguintes condições de conformação: temperaturas de 950 e 1050°C, graus de deformação real até 1,1, velocidades de deformação de 0,1, 1,0 e 10 s^{-1} . Verificou-se, contudo, que teores de boro iguais ou superiores a 0,0005% suprimiram a recristalização dinâmica para o ensaio feito a 950°C e $0,1 \text{ s}^{-1}$. Note-se, contudo, que este valor de velocidade de deformação está muito distante do aplicado sob condições industriais. De toda forma, também foi constatado que o boro retarda a cinética da recristalização estática da austenita: a fração recristalizada medida quatro segundos após a aplicação de uma deformação de 65% a 950°C sob taxa de 10 s^{-1} caiu de 0,85, no caso do aço isento de boro, para 0,60 no caso de aço com 0,0017% de boro [7].

Do ponto de vista prático há indicações informais de que algumas usinas preferem classificar aços ao boro dentro de uma categoria especial nas tabelas hierárquicas do sistema de automação do laminador de tiras a quente. Isto representa um reconhecimento implícito de que tais materiais apresentam um comportamento diferente em termos de resistência à deformação a quente, mas que não foi formalmente caracterizado. Por outro lado, um trabalho informa que as cargas na laminação de tiras a quente de um aço com 0,06% C, 0,25% Mn, 0,050% Al e 0,005% B não apresentaram alterações significativas em relação a um aço similar isento de boro, mantendo-se temperatura objetivada de acabamento igual a 880°C [8].

O sistema de automação do laminador de tiras a quente da COSIPA não leva em conta a presença de boro nos aços. Contudo, constata-se com certa frequência o aparecimento de anomalias nos coeficientes de aprendizado de carga de laminação para aços contendo boro, indicando valores desse parâmetro superiores aos constatados para ligas similares mas isentas desse elemento de liga, especialmente quando as temperaturas de laminação são relativamente baixas. Decidiu-se então desenvolver um trabalho para se verificar a possível influência do boro sobre a resistência à deformação a quente dos aços de baixo carbono.

- Procedimento Experimental

Foram coletados dados de 5613 bobinas processadas no laminador de tiras a quente da COSIPA, com espessura final entre 2,00 e 5,71 mm, as quais apresentaram as seguintes amplitudes em termos de teores de elementos de liga: 0,026-0,214% C, 0,12-0,83% Mn, 0,00-0,35% Si, 0,002-0,160% Al, 0,0000-0,0071% B e 0,0005-0,0115% N. Esse conjunto incluía 853 bobinas a quente feitas de aço isento de boro.

Para cada bobina foram coletados os respectivos dados de composição química, além de espessura de entrada/saída, largura, temperatura, velocidade de deformação e carga de laminação relativos aos passes aplicados em cada cadeira de laminação do trem acabador do laminador de tiras a quente. A partir desses resultados a resistência média à deformação a quente $\bar{\sigma}$ foi calculada a partir da fórmula:

$$\bar{\sigma} = \frac{P}{L \sqrt{R (h_i - h_f)} Q_s} \quad (1)$$

onde **L** é a largura da tira, **R** é o raio médio dos cilindros de trabalho, **h_i** é a espessura de entrada, **h_f** é a espessura de saída, **P** é a carga de laminação e **Q_s** é um parâmetro geométrico em função do arco de contato, calculado conforme o modelo de Sims [9].

As análises e correlações numéricas visando determinar o efeito do boro sobre a resistência à deformação a quente foram feitas usando-se o programa computacional *Statistica*.

- Resultados Experimentais e Discussão

A figura 1 mostra as evoluções dos valores médios de temperatura, grau e velocidade de deformação ao longo do trem acabador para os laminados estudados neste trabalho. Como se pode observar, os graus de deformação aplicados diminuíram à medida em que o esboço assumia menor espessura; já as velocidades de deformação se mantiveram crescentes, exceto na última cadeira, onde foi aplicado grau mínimo de deformação.

Foi inicialmente realizada uma análise exploratória para se verificar os possíveis efeitos do boro sobre a resistência à deformação a quente. Os dados relativos às bobinas estudadas neste trabalho foram divididos em dois subconjuntos. O primeiro deles englobou os chamados aços ao C, isentos de boro. O segundo subconjunto, de aços ao B, era relativo às bobinas a quente que continham teores desse elemento entre 0,001 e 0,007%, inclusive; o teor médio desse elemento neste rol foi igual a 0,0035%. Os valores de teores dos demais elementos de liga e parâmetros operacionais foram similares para os dois conjuntos de dados.

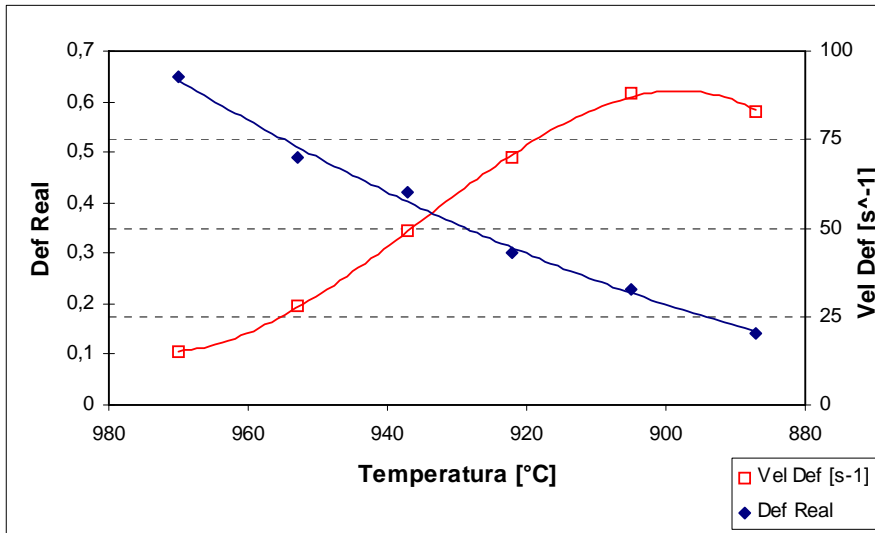


Figura 1: Evolução dos valores médios de temperatura, grau e velocidade de deformação ao longo do trem acabador do laminador de tiras a quente para as bobinas estudadas neste trabalho.

A tabela I permite comparar os valores médios de resistência à deformação a quente observados para os aços ao C e ao B em cada cadeira do trem acabador. Como se pode observar, os aços ao B apresentaram resistência à deformação a quente significativamente superior aos aços ao C apenas nas cadeiras F5 e F6 do trem acabador; os aumentos constatados foram respectivamente iguais a 15% e 11%. Note-se que o teste *t* das médias mostrou o efeito do boro foi significativo para todas as cadeiras com probabilidade superior a 99% (ou seja, $p < 0,01$). Esta foi a primeira evidência sistemática do efeito do boro sobre a resistência à deformação dos aços. Também ficou evidente que esse efeito ocorre para temperaturas de laminação relativamente baixas, fato que confirma as constatações esparsas feitas durante a prática de laminação desses aços. Note-se que, em tese, os graus de deformação progressivamente menores aplicados ao longo do trem acabador devem ter contrabalançado parcialmente esse aumento na resistência à deformação a quente. Já a contribuição da velocidade de resfriamento deve ter sido positiva, já que esse parâmetro elevou-se consideravelmente ao longo da seqüência de passes aplicada no trem acabador.

Tabela I: Valores médios dos parâmetros de laminação e resistência à deformação a quente determinados para aços ao C e ao B nas cadeiras do trem acabador do laminador de tiras a quente.

Cadeira	Parâmetros	Aços ao C [MPa]	Aços ao B [MPa]	Δ [MPa]
F1	T = 970°C $\varepsilon = 0,65$ $\dot{\varepsilon} = 15 \text{ s}^{-1}$	124	130	+6 (+5%)
F2	T = 953°C $\varepsilon = 0,49$ $\dot{\varepsilon} = 28 \text{ s}^{-1}$	150	158	+8 (+5%)
F3	T = 937°C $\varepsilon = 0,42$ $\dot{\varepsilon} = 49 \text{ s}^{-1}$	177	184	+7 (+4%)
F4	T = 923°C $\varepsilon = 0,30$ $\dot{\varepsilon} = 70 \text{ s}^{-1}$	214	219	+5 (+2%)
F5	T = 905°C $\varepsilon = 0,23$ $\dot{\varepsilon} = 88 \text{ s}^{-1}$	234	270	+36 (+15%)
F6	T = 887°C $\varepsilon = 0,14$ $\dot{\varepsilon} = 83 \text{ s}^{-1}$	266	300	+36 (+11%)

O ideal agora seria usar os dados experimentais obtidos para se ajustar um modelo geral para cálculo da resistência à deformação a quente como, por exemplo, o proposto por Hajduk [4]:

$$\bar{\sigma} = a e^{-bT} \varepsilon^c \dot{\varepsilon}^d \quad (2)$$

onde a resistência média à deformação a quente $\bar{\sigma}$ pode ser calculada a partir da temperatura **T**, grau de deformação ε e velocidade de deformação $\dot{\varepsilon}$. Tal ajuste permitiria uma análise mais detalhada sobre o efeito do boro na resistência à deformação a quente. Contudo, conforme mostra o gráfico da figura 1, há forte correlação entre as variáveis independentes dessa equação; essa constatação qualitativa é corroborada pelos valores dos coeficientes de correlação **r** entre elas, mostrados na tabela II. Isso não impede o ajuste numérico entre os dados e a equação, mas as constantes empíricas **a**, **b**, **c** e **d** podem assumir valores incoerentes do ponto de vista físico, inviabilizando a análise fenomenológica.

Tabela II: Coeficientes de correlação r observados a partir dos dados deste trabalho entre as variáveis independentes normalmente usadas nos modelos para cálculo da resistência à deformação a quente.

Interação	r
$T \times \varepsilon$	+0,861
$T \times \dot{\varepsilon}$	-0,710
$\varepsilon \times \dot{\varepsilon}$	-0,777

Em função desse problema optou-se então por usar modelos prontos para cálculo de resistência a quente a partir da temperatura, grau e velocidade de deformação já estabelecidos na literatura, aplicando-se a eles um fator de correção calculado a partir dos dados obtidos neste trabalho. Foram testados os modelos de Misaka e Shida [4], sendo que este último apresentou desempenho ligeiramente melhor. Note-se também que ele já é usado pelo sistema de automação do laminador de tiras a quente da COSIPA em função de seu melhor desempenho sob condições industriais em relação aos demais modelos disponíveis na literatura. Numa primeira abordagem foi proposto um fator de correção polinomial para esse modelo calculado em função dos teores de elementos de liga. O resultado da regressão múltipla *stepwise* mostrou que somente o boro apresentou efeito estatístico relevante nesse caso, tendo sido obtida a seguinte equação para ajuste:

$$\bar{\sigma} = (0,852 + 16,313 B) \sigma_{Shida} \quad (3)$$

com coeficiente de correlação r igual a 0,968 e erro padrão da estimativa de 53 MPa. A seleção isolada do boro pela regressão *stepwise* já era esperada, já que os dados para análise foram selecionados de forma a minimizar a amplitude dos teores dos demais elementos de liga.

Contudo, essa abordagem de ajuste não levou em conta o efeito da temperatura, variável que aparentemente exerce alguma influência no efeito endurecedor proporcionado pelo boro. Isso foi confirmado pela segunda equação de ajuste proposta, onde o boro foi incluído no termo exponencial que expressa a influência da temperatura:

$$\bar{\sigma} = \left[0,5876 + e^{(17,683 + 52,084 B - 0,0207 T)} \right] \sigma_{Shida} \quad (4)$$

a qual apresentou coeficiente de correlação r igual a 0,835 e erro padrão da estimativa de 33 MPa. Particularmente este último parâmetro indicou um nível de ajuste bem melhor do que o obtido na primeira tentativa. Como já seria de se esperar, o termo exponencial indicou elevação no valor da resistência à deformação a quente proporcional ao teor de boro e inversamente proporcional à temperatura, refletindo as constatações já efetuadas neste trabalho.

Esta equação permite prever qual seria a taxa de aumento no valor da resistência à deformação a quente em função da temperatura de deformação e do teor de boro, conforme demonstra o gráfico da figura 2. Ele mostra que essa taxa de aumento se eleva exponencialmente com o abaixamento da temperatura e o aumento do teor de boro. Por exemplo, um aço com 0,001% de boro mal teria um aumento de 4% na sua resistência à deformação a quente a 875°C em função da presença desse elemento. Note-se que esta foi a menor temperatura disponível nos dados deste trabalho. Por outro lado, uma liga com 0,007% de boro já poderia apresentar um aumento de 30% sob idênticas condições. Sob temperatura de 1025°C a presença de boro nos teores aqui pesquisados teria efeito praticamente desprezível na resistência à deformação a quente.

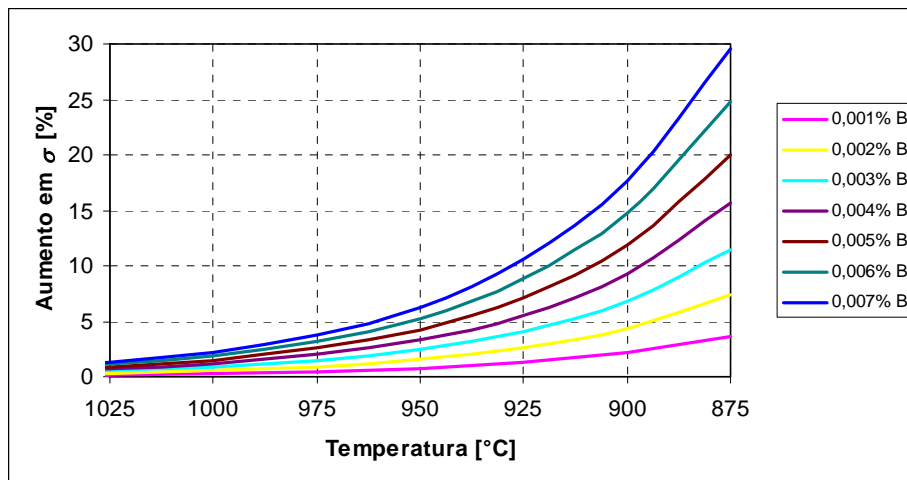


Figura 2: Aumento na resistência à deformação a quente em função da temperatura e do teor de boro previsto pelo ajuste do modelo de Shida aos dados experimentais deste trabalho.

Pode-se lembrar que o aumento na resistência à deformação a quente constatado na tabela I foi bem menor: 15 e 11%, respectivamente, nas duas últimas cadeiras do laminador. Esse resultado, contudo, é compatível com o teor médio de boro no conjunto de dados de aços ao boro usado na elaboração dessa tabela, que foi igual a 0,0035%. Para esse teor de boro o aumento previsto pela equação ajustada de Shida sobre a resistência à deformação a quente é da ordem de 9 a 12% para temperaturas entre 905 e 885°C.

O fato do efeito endurecedor do boro somente se manifestar sob temperaturas relativamente baixas parece sugerir a ocorrência de um progressivo efeito retardador sobre a recristalização estática da austenita. Essa hipótese, já levantada na literatura [6,7], somente poderia ser confirmada através de estudos controlados em escala laboratorial. Um melhor conhecimento a esse respeito poderia ser muito útil do ponto de vista operacional, já que o nível de acerto da bitola e qualidade da planicidade de um aço ao boro laminado a quente depende da precisão com que o sistema de automação

calcula os valores de carga nos últimos passes de laminação, quando o material se encontra sob temperaturas relativamente baixas. Isso será ainda mais importante no caso dos aços microligados ao nióbio-boro, onde o efeito retardador sobre a recristalização da austenita é bastante severo [7].

- Conclusões

Os resultados obtidos por este trabalho confirmaram as suspeitas levantadas operacionalmente acerca do efeito endurecedor do boro sobre a austenita laminada a quente, particularmente para temperaturas abaixo de aproximadamente 910°C. A análise global de dados provenientes de mais de 5.000 bobinas revelou que o boro elevou de 11 a 15% os valores de resistência à deformação a quente calculados a partir das cargas medidas nas últimas cadeiras do trem acabador. O modelo de Shida ajustado aos dados aqui obtidos revelou que esse aumento na resistência à deformação a quente efetivamente é proporcional ao teor de boro da liga e inversamente proporcional à temperatura de laminação, podendo chegar a 30% no caso de aço ao carbono com 0,007% de boro laminado a 875°C. Caso esse efeito não for considerado poderão ocorrer efeitos indesejados, como a contaminação dos coeficientes de aprendizado ou mesmo comprometimento na precisão da bitola do laminado devido à flutuações inesperadas de carga e na correspondente resposta da cedagem da cadeira. A situação poderá ser ainda mais séria no caso de aços ao boro microligados com nióbio, onde a literatura indica que o efeito retardador na recristalização entre passes da austenita será muito intenso devido ao efeito sinérgico proporcionado por esses dois elementos de microliga. O efeito do boro pode ser incorporado na equação para cálculo da resistência à deformação a quente ou, alternativamente, criando-se classes especiais para esse tipo de aço dentro das tabelas hierárquicas dos sistemas de automação do laminador de tiras a quente.

- Referências Bibliográficas

1. GORNI, A.A. & CAVALCANTI, C.G. Efeito dos Elementos de Liga sobre a Resistência à Deformação a Quente de Aços ao Carbono e Microligados. In: II CONGRESSO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS. Anais. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo, Outubro de 1997.
2. GORNI, A.A. e outros. Modelamento Matemático do Efeito dos Elementos de Liga dos Aços sobre sua Resistência à Deformação a Quente In: 56° CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS. Anais. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Belo Horizonte, Julho de 2001.
3. GORNI, A.A. e outros. Efeito da Composição Química na Resistência à Deformação a Quente de Aços de Baixo Carbono. In: 59° CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS. Anais. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo, Julho de 2004.

4. GORNI, A.A. Cálculos de Laminação. In: **Apostila do Curso Laminação de Produtos Planos**. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Outubro de 2004.
5. MEDINA, S.F. & HERNANDEZ, C.A. Z as a Function of Chemical Composition of Low Alloy and Microalloyed Steels. **Acta Materialia**, v. 44, n. 1, 1996, p. 137-148.
6. MAVROPOULOS, L.T. e outros. Boron Segregation during the Deformation and Recrystallization of Austenite in High Temperatures. In: INT. CONF. ON PHYSICAL METALLURGY OR THERMOMECHANICAL PROCESSING OF STEELS AND OTHER METALS. Proceedings. ISIJ, Tokyo, June 1988, 106-113.
7. TSUJI, N. e outros. Effect of Boron Addition on the Microstructure of Hot Deformed Ti-Added Interstitial Free Steel. **ISIJ International**, v. 37, n. 8, August 1997, p. 797-806.
8. DIXIT, J.K. e outros. Thin Gauge Hot Rolling at Tata Steel. **Tata Search**, v. 2, 2003, p. 346-349.
9. MACCAGNO, T.M. e outros. Determination of T_{nr} from Rolling Mill Logs - Comparison with Laboratory Data. **ISIJ International**, v. 34, n. 11, November 1994, 917-922.

THE EFFECT OF BORON ON THE HOT STRENGTH OF CARBON STEELS ¹

*Antonio Augusto Gorni*²

*José Herbert Dolabela da Silveira*³

*Pedro Segundo da Silva Vallim*⁴

Abstract

The formula for hot strength calculation used in the automation system of the COSIPA's hot strip mill does not account for the possible effect of boron over this parameter, as the information available about this subject in the literature is very scarce and sometimes contradictory. However, the operational practice at COSIPA hot strip mill shows that the processing of some hot coils of boron steel required higher rolling forces, specially when the finishing temperature was relatively low. The objective of this work was to verify the real effect of boron over hot strength during the hot strip rolling of carbon steels. An analysis of industrial data confirmed that boron, in the content range from 0.001% to 0.007%, effectively promoted an increase of 11 to 15% in hot strength for rolling temperatures lower than 910°C. An adapted Shida hot strength model, fitted with data available in this work, predicts that the increase of hot strength for a 0.007% boron steel hot rolled at 875°C can reach about 30%.

Keywords: Hot Strength, Boron, Hot Strip Mill

¹ Paper to be presented at the 42th Rolling Seminar – Processes, Rolled and Coated Products, Santos (Brazil), October 25 to 28, 2005.

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

⁴ 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: pedrovallin@cosipa.com.br