

EFEITO DA RECRISTALIZAÇÃO DINÂMICA NA RESISTÊNCIA À DEFORMAÇÃO DE AÇOS PROCESSADOS NO LAMINADOR DE TIRAS A QUENTE ¹

Antonio Augusto Gorni ²
Pedro Segundo da Silva Vallin ³

RESUMO

A maioria das fórmulas empíricas para cálculo da resistência à deformação a quente de aços de baixo carbono parte do princípio de que o grau de deformação a ser aplicado é relativamente pequeno, correspondendo à faixa do gráfico tensão versus deformação onde a curva é monotonamente crescente. Contudo, dados da literatura e prática industrial da COSIPA indicam que esta premissa não é sempre válida para as primeiras cadeiras do Trem Acabador do Laminador de Tiras a Quente, onde o grau de deformação muitas vezes é suficientemente alto para promover recristalização dinâmica no material, fenômeno metalúrgico que reduz a magnitude de sua resistência à deformação a quente. Este trabalho teve como objetivo modelar a resistência à deformação a quente de aços carbono-manganês processados no Laminador de Tiras a Quente usando-se o algoritmo de Siciliano, que leva em conta os efeitos da recristalização dinâmica nessa grandeza. Os resultados obtidos mostraram que o novo modelo apresentou precisão bem maior que o algoritmo atualmente usado pelo sistema de automação do Laminador de Tiras a Quente, inclusive nas cadeiras onde não se prevê a ocorrência de recristalização dinâmica.

Palavras-Chave: Resistência à Deformação a Quente, Recristalização Dinâmica, Modelo Matemático

¹ Trabalho a ser apresentado ao 40º Seminário de Laminação - Processos e Produtos Laminados e Revestidos, Vitória (ES), 21 a 23 de Outubro de 2003.

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 Mecânico, 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 maioria das fórmulas matemáticas usadas para o cálculo da resistência a quente de aços como, por exemplo, as de Shida, Misaka e Hajduk [1], considera que esse parâmetro é monotonamente crescente com o grau de deformação aplicado. Essa abordagem é válida desde que a deformação aplicado seja relativamente pequeno. Contudo, para valores maiores de redução a situação fica bem diferente.

A figura 1 mostra a evolução da resistência à deformação a quente de um aço de baixo carbono no estado austenítico em função do grau de deformação aplicado, a qual reflete a ação de diversos fenômenos metalúrgicos que também atuam no desenvolvimento microestrutural do material. Essa figura mostra que, de fato, para graus de deformação relativamente pequenos, a resistência à deformação a quente aumenta de forma paulatina. Isso significa que o material está sofrendo encruamento, ou seja, estão sendo criados defeitos em sua microestrutura, tais como lacunas e discordâncias. A energia introduzida por eles no material ainda não é suficiente para promover processos instantâneos de restauração, como recuperação e recristalização, em escala suficiente para que possam reverter a tendência de elevação na resistência à deformação. A situação acima descrita é típica da laminação industrial de chapas grossas, onde a deformação aplicada por passe é relativamente pequena. Neste caso, uma vez que o intervalo de tempo entre passes é relativamente longo, geralmente ocorre recristalização estática plena nos aços de baixo carbono, concorrendo para se refinar a microestrutura do material.

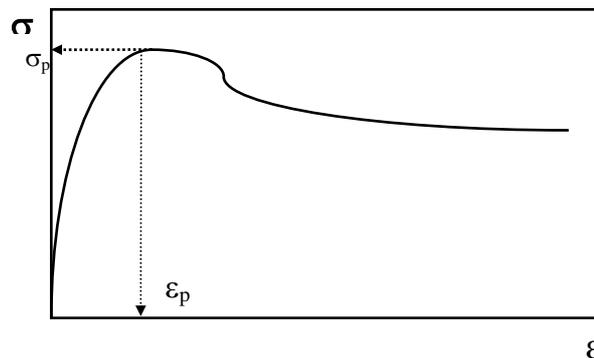


Figura 1: Evolução esquemática da resistência à deformação a quente de um aço de baixo carbono no estado austenítico em função do grau de deformação aplicado.

Contudo, à medida que se aumenta o grau de deformação aplicado ao material, chega-se a um valor onde ocorre um pico no valor de resistência à deformação a quente, identificado na figura 1 pela sigla ϵ_p . Graus de deformação superiores a esse valor produzem valores cada vez menores de resistência à deformação a quente, até que se atinge um valor de patamar. Neste caso a energia interna introduzida no material pela conformação plástica é suficiente para ativar sua recristalização de forma simultânea com a deformação; esta é a chamada recristalização dinâmica. Este tipo de fenômeno pode ocorrer durante a laminação de aços de baixo carbono; ele é favorecido pelas condições de processo típicas dessa situação: temperaturas de laminação relativamente altas, mais tamanhos de grão e velocidades de deformação relativamente baixos [2]. A recristalização dinâmica também pode ocorrer nas

cadeiras posteriores de um trem acabador caso a recristalização estática não se completar antes de uma nova deformação. A deformação residual que não foi eliminada pela recristalização estática se somará àquela que for aplicada pela cadeira seguinte. Caso o valor da deformação total (a residual mais a aplicada no passe) ultrapassar o correspondente valor de limiar ε_c ocorrerá recristalização dinâmica. Esse valor de limiar pode ser calculado pela fórmula abaixo [2]:

$$\varepsilon_c = 5,6 \times 10^{-4} d_0^{0,3} Z^{0,17} \quad (1)$$

onde d_0 é o tamanho de grão do material antes da deformação, dado em μm , e Z é o chamado parâmetro de Zener-Hollomon, dado pela fórmula

$$Z = \dot{\varepsilon} e^{\left(\frac{300000}{RT}\right)} \quad (2)$$

onde $\dot{\varepsilon}$ é a velocidade de deformação, dada em s^{-1} , R é a constante universal dos gases (8,31 J/mol K) e T é a temperatura em graus Kelvin.

Num trabalho anterior onde se determinou os valores de resistência à deformação a quente a partir de dados industriais do Laminador de Tiras a Quente da COSIPA [3] surgiram fortes evidências de que a ocorrência de recristalização dinâmica no material processado na F1 era um fato predominante. Foi constatado que os valores de resistência à deformação a quente caíam à medida que se elevava o grau de deformação aplicado, uma situação típica observada quando o valor do grau de deformação está acima de ε_c . Além disso, ao se ajustar os dados de resistência à deformação a quente conforme a equação de Hajduk/Misaka, constatou-se que o expoente associado ao termo do grau de deformação era negativo; ou seja, a contribuição da deformação à resistência à quente do material era negativa, confirmando a suspeita sobre a ocorrência de recristalização dinâmica.

Nos últimos anos foram desenvolvidos alguns modelos que objetivaram modelar de forma global a curva grau de deformação versus resistência a quente de aços de baixo carbono, incluindo o efeito da recristalização dinâmica, usando-se equações empíricas [4,5] ou redes neurais [6]. Um deles é o proposto por Siciliano e outros [2], que apresenta o seguinte formato geral:

$$\sigma = 9,8 (a + b Mn) \sigma_{Mis} (1 - X_{din}) + k \sigma_{ss} X_{din} \quad (3)$$

onde σ_{Mis} é a equação de resistência à deformação a quente calculada pela fórmula de Misaka, em $[\text{kgf}/\text{mm}^2]$; a e b são constantes da reta de regressão que ajusta os valores calculados pela equação de Misaka com valores reais de resistência à deformação a quente obtidos a partir de resultados industriais em função do teor de Mn do aço; X_{din} é o grau de amaciamento verificado entre o valor de pico da curva de resistência à deformação a quente versus grau de deformação e o valor de patamar proporcionado pela recristalização dinâmica; k é o fator de conversão entre tensão e resistência média à deformação, sendo aproximadamente igual a 1,14; e, finalmente, σ_{ss} é o valor de patamar da resistência à deformação a quente após a ocorrência de recristalização dinâmica. A memória de cálculo dessa equação pode ser encontrada

em [2], envolvendo o uso de um modelo para cálculo da evolução microestrutural do material ao longo do Laminador de Tiras a Quente.

A resistência à deformação a quente é um parâmetro de fundamental importância para o cálculo de carga de laminação e, portanto, para a definição do esquema de passes correto para o trem acabador do laminador de tiras a quente. Decidiu-se, portanto, fazer-se uma comparação entre a nova metodologia para cálculo de resistência à deformação a quente proposta por Siciliano e outros [2] e a atual fórmula usada no modelo matemático do sistema de automação do Laminador de Tiras a Quente da COSIPA, para verificar se de fato pode-se conseguir uma melhoria na precisão de cálculo da resistência à deformação a quente usando-se essa nova abordagem. Para se simplificar a análise, restringiu-se este trabalho aos aços de baixo carbono, sem elementos de liga. A equação para cálculo da resistência à deformação a quente atualmente usada pelo sistema de automação do Laminador de Tiras a Quente é baseada na equação de Shida [7], ajustada por um fator de correção em função dos teores de silício e nióbio do aço.

- PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os dados necessários para o cálculo da resistência à deformação a quente dos aços processados no Laminador de Tiras a Quente da COSIPA podem agora ser facilmente conseguidos em função do extensivo sistema de coleta de dados que foi implantado juntamente com seu sistema de automação. Dessa forma, foram coletados dados de 15.504 laminados de aço ao carbono-manganês, incluindo-se a composição química do material processado e dados completos sobre o esquema de passes empregado. A partir dessa massa de dados foram determinados os valores da resistência à deformação a quente.

O cálculo da resistência à deformação a quente foi feito baseando-se no procedimento descrito em [8]: 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.

Dessa forma transformou-se a massa de dados operacionais original em registros contendo os valores de resistência à deformação a quente, composição química, temperatura, grau e velocidade de deformação associados à cada passe aplicado em todas as cadeiras do Trem Acabador do Laminador de Tiras a Quente, os quais foram usados na análise a seguir.

- RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

Em primeiro lugar foi estabelecida uma correlação linear entre as resistências à deformação a quente reais e as calculadas pela equação de Misaka em função do teor de manganês do aço em questão. Foram definidas equações de correlação para cada cadeira de laminação, as quais foram incorporadas ao modelo proposto por Siciliano e outros [2].

A seguir foram feitos os cálculos de resistência à deformação a quente usando-se o modelo de Shida modificado programado no sistema de automação do laminador e o modelo proposto neste trabalho. A tabela 1 mostra um resumo dos erros padrão da estimativa obtidos para cada abordagem de modelamento e para cada cadeira de laminação, enquanto que as figuras 2 e 3 mostram uma comparação gráfica entre os resultados reais e os calculados.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Shida Modificado	64	63	79	51	28	53
Siciliano	15	12	9	15	26	27
Melhoria [%]	77	81	89	71	7	49
Recr. Dinam. [%]	93	92	53	0	0	0

Tabela 1 Valores dos erros padrão da estimativa, em MPa, obtidos em função de cada modelo para cálculo de resistência à deformação a quente estudado neste trabalho, para cada cadeira de laminação do Trem Acabador do Laminador de Tiras a Quente.

Os resultados da tabela 1 mostram claramente que o novo modelo proposto é superior em precisão ao antigo, sem distinção de cadeira de laminação. O maior ganho de precisão no cálculo da resistência à deformação a quente foi conseguido para a cadeira F3, onde o novo modelo proporcionou uma redução de 87% na magnitude dos erros. As cadeiras F2, F1 e F4 também ganharam bastante em precisão: 81, 77 e 71%, respectivamente. O ganho observado na F6 foi bom, ainda que não tão grande: 49%. O menor ganho ocorreu na cadeira F5, onde a melhoria de precisão foi de apenas 7%. O menor ganho de precisão observado nas cadeiras posteriores pode estar associado ao fato de que a ocorrência de recristalização dinâmica é virtualmente impossível nas condições de laminação nelas reinantes. De fato, conforme mostram os dados da tabela I, o número de laminados a quente processados sob recristalização dinâmica cai nas cadeiras posteriores, ficando zerado a partir da cadeira F4 inclusive.

Ambos os modelos tenderam a superestimar valores de resistência à deformação a quente com magnitude relativamente pequena, exceto nas cadeiras F3 e F4, onde essa tendência não ficou clara. Os resultados do modelo de Shida modificado tenderam a superestimar os valores reais, com os valores do desvio sendo maiores para os valores de resistência a quente com baixa magnitude. Já os resultados do modelo de Siciliano tenderam a superestimar os valores de resistência à deformação a quente com magnitude relativamente baixa, enquanto tendiam a subestimar os valores com magnitude relativamente alta.

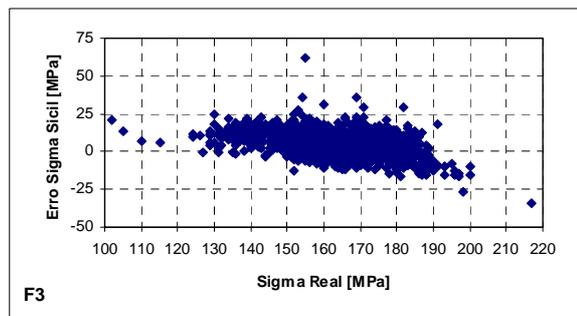
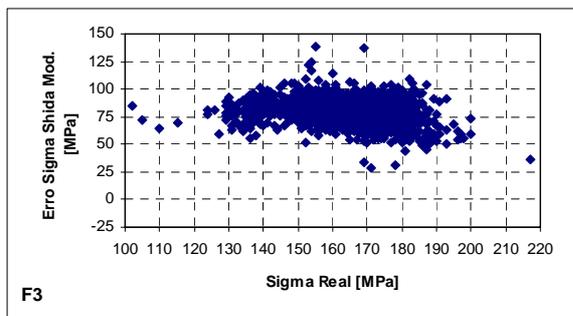
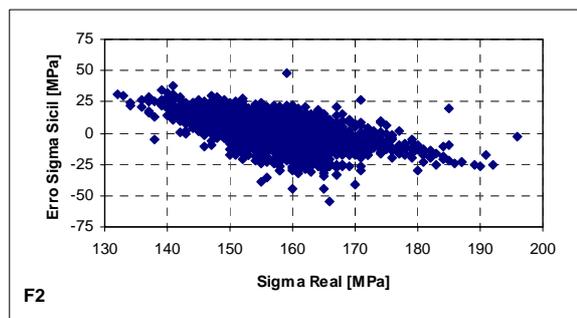
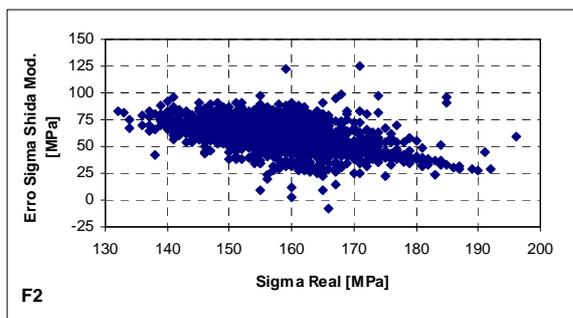
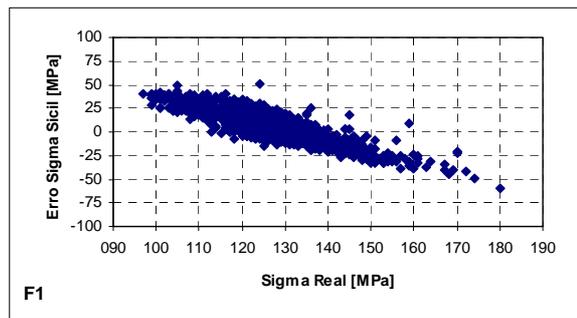
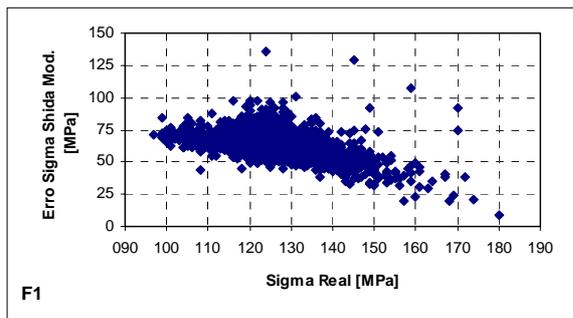


Figura 2: Comparação entre os erros associados ao cálculo da resistência à deformação a quente de acordo com o modelo de Shida modificado e o modelo de Siciliano para as cadeiras F1 a F3 do Trem Acabador do Laminador de Tiras a Quente da COSIPA.

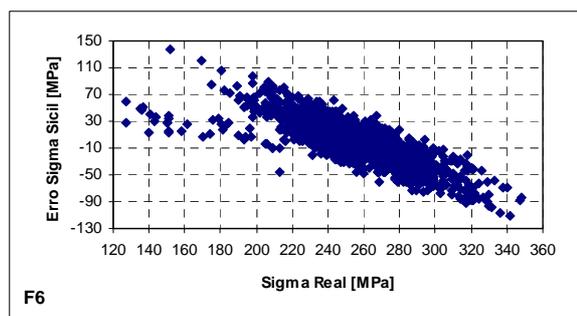
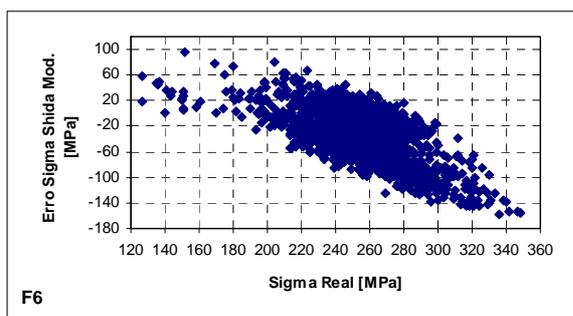
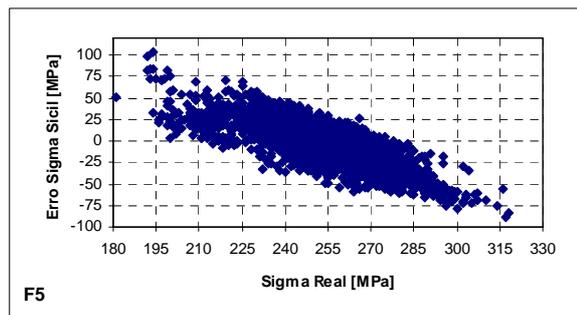
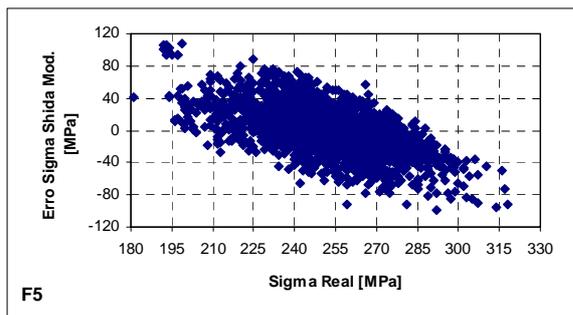
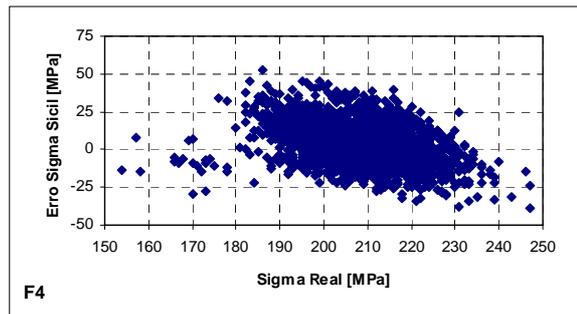
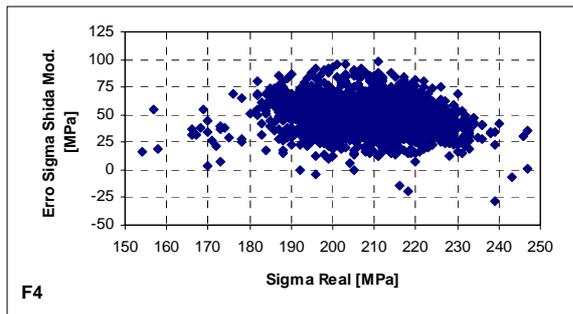


Figura 3: Comparação entre os erros associados ao cálculo da resistência à deformação a quente de acordo com o modelo de Shida modificado e o modelo de Siciliano para as cadeiras F4 a F6 do Trem Acabador do Laminador de Tiras a Quente da COSIPA.

- CONCLUSÕES

Os resultados deste trabalho mostraram que o efeito de amaciamento proporcionado pela recristalização dinâmica incorporado pelo modelo proposto por Siciliano elevou significativamente a precisão do cálculo da resistência à deformação a quente em relação ao modelo de Shida modificado que é usado pelo sistema de automação do Trem Acabador do Laminador de Tiras a Quente da COSIPA. O modelo também apresentou resultados favoráveis também quando aplicado a cadeiras onde não houve a ocorrência de recristalização dinâmica - ou seja, F4, F5 e F6.

A aplicação desse novo modelo ao sistema de automação industrial depende de uma análise posterior para se verificar o ganho que ele proporcionaria na precisão final de bitola do laminado e também qual é seu grau de confiabilidade, além de sua extensão aos demais produtos processados no Laminador de Tiras a Quente, incluindo-se aí aços microligados.

- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. GORNI, A.A. & CAVALCANTI, C.G. LI Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Porto Alegre, Agosto de 1996.
2. SICILIANO JR., F. e outros. ISIJ International, December 1996, 1500-1506.
3. GORNI, A.A. & VALIN, P.S.S. A ser apresentado no Seminário de Automação de Processos da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Santos, Outubro de 2003.
4. JAECKEL, I. Steel Research, 62, (10), October 1991, 441-446.
5. SPITTEL, T. & SPITTEL, M. Scandinavian Journal of Metallurgy, 19, (6), 1990, p. 85-94.
6. GORNI, A.A. I Semana de Conformação, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Joinville, Setembro de 1993.
7. TAMURA, I. e outros. Thermomechanical Processing of High Strength Low Alloy Steels. Butterworths, London, 1988, 248 p.
8. MACCAGNO, T.M. ISIJ International, November 1994, 917-922.

EFFECT OF DYNAMIC RECRYSTALLIZATION OVER THE HOT STRENGTH OF STEELS PROCESSED IN THE HOT STRIP MILL ¹

Antonio Augusto Gorni ²
Pedro Segundo da Silva Vallin ³

ABSTRACT

Most empirical formulas for the calculation of the hot strength of low carbon steels were developed considering that the strain to be applied to the specimen is relatively low, being included inside the range of values that produces a monotonically increasing curve in the graphic hot strength versus strain. However, data from the literature and from the industrial practice of COSIPA show that this approach is not always valid for the conditions prevalent in the first stands of the finishing train of the hot strip mill. The strain applied to the rolling stock in these stands is high enough to promote a dynamic recrystallization in the steel, a metallurgical phenomena that significantly decreases its hot strength. This aim of this work is to develop a mathematical model for the calculation of hot strength of carbon-manganese steels processes in the hot strip mill of COSIPA using the algorithm developed by Siciliano, which takes account of the dynamic recrystallization effect. The results produced by this model showed higher precision than the algorithm that presently is used the the automation system of the hot strip mill. This was also observed in the stands where teoretically there is no occurrence of dynamic recrystallization.

Keywords: Hot Strength, Dynamic Recrystallization, Mathematical Model

¹ Paper to be presented at the 40th Rolling Seminar - Processes and Rolled/Coated Products, Vitória (ES), October 21 to 23, 2003.

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

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