

O EFEITO DOS ELEMENTOS DE LIGA NA RESISTÊNCIA À DEFORMAÇÃO A QUENTE DOS AÇOS ESTRUTURAIS RESISTENTES À CORROSÃO ATMOSFÉRICA¹

Antonio Augusto Gorni²
Marcos Roberto Soares da Silva³
Pedro Segundo da Silva Vallim⁴
José Herbert Dolabela da Silveira⁵

Resumo

O objetivo deste trabalho foi melhorar a precisão dos valores de carga de laminação calculados durante o processamento de aços patináveis no Trem Acabador do Laminador de Tiras a Quente, incluindo o efeito do Cu e Cr nas equações originais para cálculo da resistência à deformação. Os resultados aqui obtidos mostraram que esses elementos de liga alteram significativamente a magnitude da resistência a deformação a quente observada no Trem Acabador. Também foi realizado um estudo preliminar sobre os aços estruturais patináveis onde parte do Cu foi substituído por Si, onde foram observadas alterações ainda mais significativas na evolução da resistência à deformação a quente.

Palavras-Chave: Aços Patináveis, Resistência à Deformação a Quente, Laminação de Tiras a Quente, Automação

THE EFFECT OF ALLOY ELEMENTS ON THE HOT STRENGTH OF STRUCTURAL WEATHERING STEELS

Abstract

The aim of this work was to improve the precision of the calculated rolling loads during the processing of weathering steels in the Finishing Mill, as the original equations used for the calculation of hot strength did not include the effect of Cu and Cr. The results got from this work showed that these alloy elements changed significantly the values of hot strength observed in the rolling stands of the Finishing Mill. It was also performed a preliminary study about structural weathering steels where part of the Cu content was replaced by Si, which detected an even more significant change in the hot strength evolution.

Keywords: Weathering Steels, Hot Strength, Hot Strip Mill, Automation

¹ Trabalho a ser apresentado ao 62º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, Vitória (ES), 23 a 27 de Julho de 2007.

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, C.Q.E., Analista de Processos da Gerência de Suporte Técnico da Laminação a Quente, Companhia Siderúrgica Paulista – COSIPA, Cubatão SP. E-Mail: marcoasilva@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

⁵ Membro da ABM. Engenheiro Metalurgista, M. Eng., M.B.A., Gerente de Suporte Técnico da Laminação a Quente, Companhia Siderúrgica Paulista – COSIPA, Cubatão SP. E-Mail: herbert@cosipa.com.br

- Introdução

A incorporação de determinados elementos de liga permite aumentar de forma muito eficaz a resistência à corrosão atmosférica de aços estruturais, criando uma nova classe de produtos, os assim chamados aços patináveis. O papel dessas adições consiste em aumentar a aderência da camada oxidada que se forma sobre a superfície, a qual possui caráter protetivo.

O cobre é um elemento consagrado nessa aplicação, mas seu uso pode acarretar desvantagens à liga, em função de seu alto custo e da maior probabilidade do aparecimento de defeitos superficiais devido à susceptibilidade à fragilidade a quente que ele promove. Por esses motivos seu teor na liga é minimizado em alguns casos, sendo então complementado por elementos coadjuvantes, tais como níquel, silício, cromo, fósforo e/ou molibdênio. O silício, em particular, apresenta outras vantagens, como a promoção de acentuado endurecimento por solução sólida, acrescentando 84 MPa na resistência mecânica do aço a cada ponto percentual adicionado, independentemente do tratamento térmico aplicado ao produto. Além disso, esse elemento contribui para diminuir a fragilidade a quente associada ao cobre [1-3].

O endurecimento por solução sólida promovido por esses elementos de liga também se reflete na resistência à deformação a quente desses aços, afetando seu processamento na laminação ou forjamento. Foi observado que este endurecimento é proporcional à diferença entre o diâmetro atômico do elemento de liga em questão e o do ferro [4], tendo sido proposto um parâmetro, SS_{eq} , para quantificar o efeito sobre a resistência à deformação a quente decorrente dos vários elementos de liga presentes no aço [5]:

$$SS_{eq} = 27,8 C + 7,1 Mn + 4,8 Si + 13,5 Al + 3,2 Cr + 1,6 Cu + 15,9 Nb + 15,1 Ti + 6,3 V + 10,3 Mo + 1,6 Ni + 11,9 W \quad (1)$$

A partir dessa expressão pode-se observar que o efeito endurecedor dos elementos de liga mais usados em aços patináveis diminui na seqüência silício → cromo → cobre.

A elevação da resistência à deformação a quente promovido pela dupla cobre-cromo já foi constatado em diversos trabalhos [5-7]. O silício, sob teores de até 0,5%, apresenta efeito similar e ligeiramente superior ao do cobre ou cromo em aços estruturais [5-8]. Contudo, o silício aumenta significativamente a temperatura Ar_3 dos aços; teores suficientemente altos desse elemento podem fazer com que a laminação do material ocorra no campo intercrítico, ou mesmo ferrítico, ao invés do austenítico. A ferrita formada sob temperatura igual ou imediatamente abaixo da Ar_3 apresenta menor resistência à deformação a quente do que a austenita que lhe deu origem, o que reduz momentaneamente as cargas de laminação quando o esboço que está sendo laminado cruza essa faixa de temperaturas durante seu processamento [9]. A menor resistência à deformação a quente da ferrita foi atribuída ao menor coeficiente de encruamento dessa fase, em função de sua maior energia de falha de empilhamento, além do maior número de sistemas de escorregamento operantes que ela apresenta [10].

Os efeitos do cobre e cromo, bem como de maiores teores de silício, não foram considerados durante o ajuste original do modelo matemático para cálculo do esquema de passes do Trem Acabador do Laminador de Tiras a Quente da COSIPA. Foi então feito este trabalho para se determinar quantitativamente o efeito desses elementos de liga sobre a resistência à deformação a quente. O objetivo

deste desenvolvimento foi melhorar a precisão de cálculo desse parâmetro, a qual se refletirá num maior nível de acerto entre os valores previstos e reais das cargas de laminação, cedagens das cadeiras e espessuras finais das bobinas a quente de aços estruturais patináveis.

- Procedimento Experimental

Foram coletados dados de 8689 bobinas de aços estruturais patináveis ao cobre-cromo processadas no laminador de tiras a quente da COSIPA, com espessura final entre 1,91 e 11,71 mm. Esse conjunto incluía 4313 bobinas a quente feitas de aço isento de cobre e cromo.

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 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 [11].

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

- Resultados Experimentais e Discussão

Foi inicialmente realizada uma análise exploratória para se verificar os efeitos do cobre-cromo sobre a resistência à deformação dos aços processados no Trem Acabador do Laminador de Tiras a Quente. Os dados relativos às bobinas estudadas neste trabalho foram divididos em dois subconjuntos. O primeiro deles englobou os chamados aços ao carbono, isentos de cobre ou cromo. O segundo subconjunto, de aços ao cobre-cromo, era relativo às bobinas a quente que continham teores desses elementos iguais ou superiores a 0,10%. Os valores de teores dos demais elementos de liga e parâmetros operacionais foram similares para os dois conjuntos de dados.

A tabela I permite comparar os valores médios de resistência à deformação a quente observados para os aços ao carbono e ao cobre-cromo em cada cadeira do trem acabador. Pode-se observar que a presença de cobre e cromo elevou a dureza a quente do aço de 9% em média ao longo da laminação de acabamento de tiras a quente, ainda que esse valor tenha oscilado entre 3 e 13% conforme a cadeira considerada. Isso parece sinalizar que o mecanismo de endurecimento envolvido nesse caso é, de fato, solução sólida, ao contrário do que foi verificado para o caso

do boro [12], onde se observou que o aumento na resistência à deformação a quente se tornava mais intenso à medida que a temperatura decrescia – ou seja, para as cadeiras posteriores do Trem Acabador. Naquele caso o mecanismo de endurecimento preponderante parece ter sido retardamento da recristalização austenítica.

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

Cadeira	Aços ao C [MPa]	Aços ao Cu-Cr [MPa]	Δ [MPa]
F1	140	158	+18 (+13%)
F2	157	168	+11 (+7%)
F3	176	198	+22 (+13%)
F4	215	226	+11 (+5%)
F5	240	246	+6 (+3%)
F6	223	247	+24 (+11%)

Da mesma forma como ocorrido em trabalho anterior [12], não foi possível aqui desenvolver um modelo matemático plenamente válido para cálculo da resistência à deformação a quente em função dos parâmetros de processo – a saber, temperatura, grau e velocidade de deformação – e dos teores de cromo e cobre. Isso decorreu das correlações estatísticas existentes entre as variáveis independentes propostas para esse modelo, fato característico de massas de dados obtidas a partir de unidades industriais de laminação. Basta observar a tabela 1: à medida que a temperatura cai, o grau de deformação também diminui e a velocidade de deformação aumenta.

Em função desse problema optou-se então por usar modelos consagrados da literatura para cálculo de resistência a quente a partir dos parâmetros de processo, aplicando-se a eles um fator de correção em função da temperatura e dos teores de cromo e outros elementos de liga presentes no aço. Foram testados os modelos de Misaka e Shida [4] através de regressão múltipla *stepwise*, sendo que esta última fórmula apresentou desempenho ligeiramente melhor no ajuste dos dados reais. Foi proposta então a seguinte equação para ajuste dos valores calculados pela equação original de Shida:

$$\bar{\sigma} = \left[0,0972 Mn + 0,2928 Si + e^{(-3,07264 + 0,2339 Cr + 2563/T)} \right] \sigma_{Shida} \quad (2)$$

a qual apresentou coeficiente de correlação r igual a 0,790 e erro padrão da estimativa de 27 MPa.

Como se pode observar, o fator de ajuste para a equação de Shida levou em conta os teores de cromo, manganês e silício, além da temperatura de laminação, as únicas variáveis independentes consideradas significativas pela regressão múltipla *stepwise*. O teor de cobre não foi considerado significativo estatisticamente, já que essa variável apresentou forte correlação com o teor de cromo ($r = +0,98$).

Esta equação permite prever qual é a taxa de aumento no valor da resistência à deformação a quente em função da temperatura de deformação e do teor de cromo. O gráfico da figura 1 mostra que o efeito endurecedor do cromo (e cobre) elevou-se discretamente à medida que a temperatura foi abaixada, fato que decorre da presença do termo exponencial na equação (2). Por exemplo, o efeito endurecedor correspondente à adição de 0,5% de cromo aumentou de 7% a 1025°C para 11% a 875°C. O papel sutil da temperatura parece confirmar que o efeito do cromo (mais cobre) decorre fundamentalmente de endurecimento por solução sólida, sem a ocorrência de precipitação ou retardamento da recristalização austenítica.

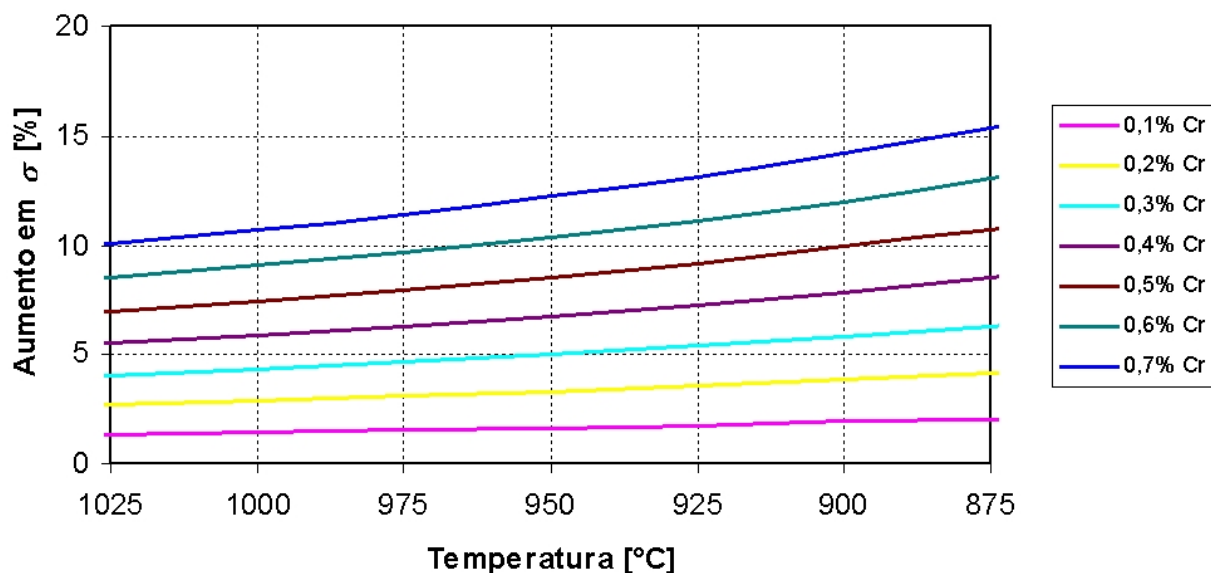


Figura 1: Aumento na resistência à deformação a quente em função da temperatura e do teor de cromo previsto pelo ajuste do modelo de Shida aos dados experimentais deste trabalho, conforme a equação (2).

Os problemas associados à fragilização a quente promovida pelo cobre levou ao surgimento dos aços patináveis ao cobre-silício-cromo [13], onde parte do cobre é substituída por silício. O maior teor deste último elemento certamente afeta a evolução da resistência à deformação a quente ao longo da laminação a quente, motivo pelo qual o estudo destas ligas também foi incluído neste trabalho. Infelizmente, no momento da realização destas análises não se dispunha de uma massa de dados industriais suficientemente grande para se efetuar um procedimento similar ao feito aqui para os aços ao cobre-cromo. Por esse motivo foi feita apenas uma comparação entre os valores de resistência à deformação a quente relativos a algumas bobinas de diferentes tipos de aços estruturais patináveis, usando metodologia semelhante à descrita acima.

O gráfico da figura 2 mostra os valores de resistência à deformação a quente determinados para cada cadeira do Trem Acabador durante o processamento de bobinas a quente de vários aços patináveis ao cobre-cromo e cobre-silício-cromo com dois níveis de resistência mecânica final, mais um aço SAE 1004 incluído para fins de comparação. Todas as bobinas aqui consideradas apresentaram condições de processamento similares em termos de espessuras inicial e final, esquemas de passe, velocidades e evoluções de temperatura.

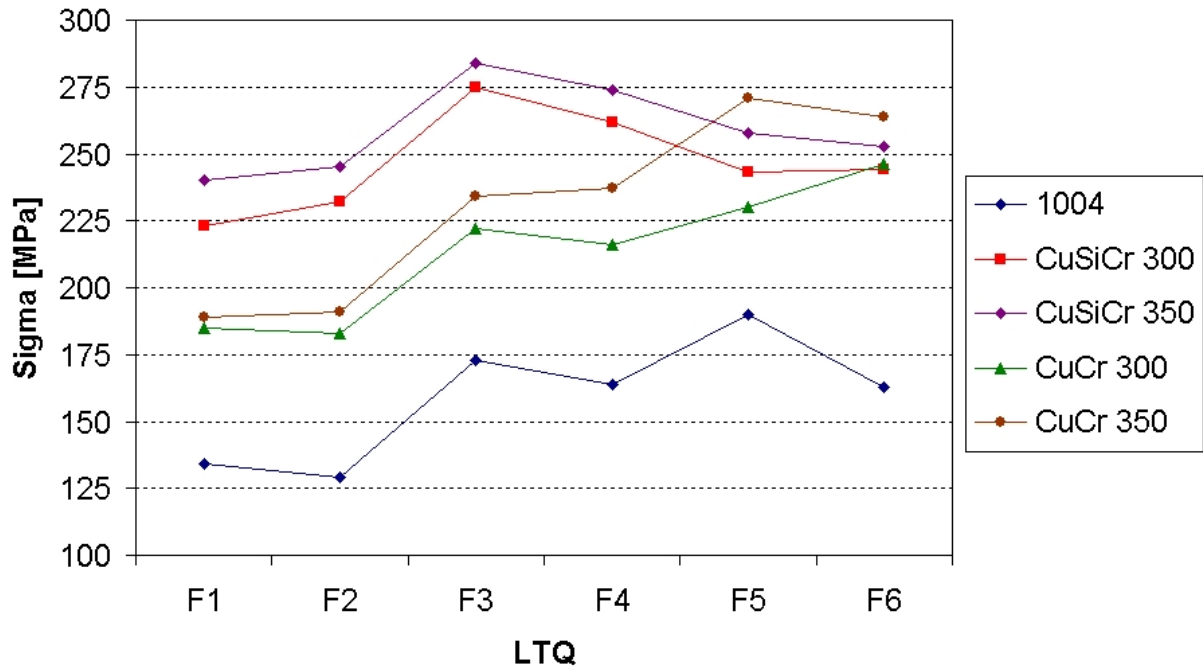


Figura 2: Comparação entre os valores de resistência à deformação correspondentes às cadeiras do Trem Acabador do Laminador de Tiras a Quente para bobinas com dimensões equivalentes, processadas sob idênticas condições, de aços patináveis ao cobre-cromo e cobre-silício-cromo, com limites de escoamento de 300 ou 350 MPa. Para fins de comparação também foram incluídos os dados relativos ao aço SAE 1004.

Os resultados apresentados na figura 2 mostram que, no caso do aço SAE 1004 e das duas variantes de aço patinável ao cobre-cromo (CuCr 300 e CuCr 350), os valores da resistência à deformação a quente aumentaram à medida que o esboço passou pelas diversas cadeiras do Trem Acabador. Esse é o padrão normal de operação para este equipamento. Obviamente os valores de resistência à deformação a quente para os aços patináveis foram maiores do que os verificados para o aço SAE 1004, o qual apresenta teor bem menor de elementos de liga substitucionais. Por sua vez, o aço patinável CuCr 350, com maior limite de escoamento (e, naturalmente, com maior teor de elementos de liga substitucionais) apresentou maiores valores de resistência à deformação a quente que o aço patinável com menor limite de escoamento, CuCr 300.

Da mesma forma, os valores de resistência à deformação a quente dos aços patináveis ao cobre-silício-cromo (CuSiCr 300 e CuSiCr 350) mostraram-se significativamente maiores do que os correspondentes ao aço cobre-cromo (CuCr 300 e CuCr 350) nas três primeiras cadeiras do Trem Acabador. Isso se deve ao maior efeito

endurecedor a quente proporcionado pelo teor superior de silício típico dos novos aços patináveis, apesar do teor ligeiramente menor de cobre que eles apresentam. Contudo, os valores de resistência a quente para os aços ao cobre-silício-cromo diminuíram para as cadeiras posteriores do Trem Acabador, chegando em certos casos a ser inferiores aos valores correspondentes observados para os aços ao cobre-cromo. Esse fato que foi associado à ocorrência de transformação ferrítica nos esboços dos aços ao cobre-silício-cromo, fato que também já havia sido observado no processamento de aços elétricos com alto teor de silício [9,10].

Esse efeito amaciante sob temperaturas decrescentes verificado para os aços ao cobre-silício-cromo foi muito oportuno, pois evitou o surgimento de cargas de laminação muito altas no final do processo de conformação, o que poderia levar a problemas de sobrecarga dos motores do laminador e no controle da planicidade do produto.

Os resultados da análise sobre o efeito do cobre, cromo e silício sobre a resistência à quente levaram à implantação de diferentes classes de hierarquia no modelo matemático de automação para os vários tipos de aços estruturais patináveis. Isso permitiu a determinação de fatores específicos de aprendizado para esses materiais, contribuindo para um maior nível de acerto entre os parâmetros de processo previstos pelos algoritmos do modelo matemático de automação e os efetivamente conseguidos, aumentando o nível de qualidade do produto em termos de precisão dimensional e de propriedades mecânicas.

- Conclusões

Os resultados deste trabalho mostraram que os aços estruturais patináveis ao cobre-cromo apresentaram maior resistência à deformação a quente em relação aos aços ao carbono comuns durante seu processamento no Trem Acabador do Laminador de Tiras a Quente em função da presença desses dois elementos de liga. A análise de 8689 bobinas processadas mostrou que o aumento na resistência à deformação a quente variou de 3 a 13% ao longo das várias cadeiras de laminação, sendo observado um aumento médio de 9%. O efeito da temperatura sobre a elevação na resistência à deformação a quente proporcionado pela dupla cobre-cromo foi muito pequeno, sinalizando que o mecanismo de endurecimento envolvido aqui foi fundamentalmente por solução sólida.

Já os estudos preliminares envolvendo os aços patináveis ao cobre-silício-cromo mostraram que esse material apresenta um comportamento peculiar durante seu processamento no Trem Acabador do Laminador de Tiras a Quente: nas primeiras cadeiras sua resistência à deformação a quente é muito alta e crescente à medida que a temperatura se abaixa, em função do forte efeito de endurecimento por solução sólida proporcionado pelo teor relativamente alto de silício. Contudo, a partir da quarta cadeira, ocorreu queda significativa na resistência à deformação a quente em decorrência da transformação ferrítica do material, a qual pode igualmente ser atribuída à presença de altos teores de silício.

Em ambos os casos o padrão de resistência à deformação a quente observado ao longo do processamento foi muito diferente em relação ao constatado para aços ao carbono convencionais. Por esse motivo foram atribuídas diferentes classes hierárquicas para os aços estruturais patináveis processados no Laminador de Tiras a Quente, o que permitiu que o modelo matemático do sistema de automação calculasse fatores de aprendizado específicos e otimizados para essas classes especiais

de produto. Isso contribuiu para um menor nível de dispersão nas características dimensionais e mecânicas das bobinas a quente desses materiais.

- Referências Bibliográficas

1. PANNONI, F.D. História, Comportamento e Uso dos Aços Patináveis na Engenharia Estrutural Brasileira. In: 59° Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. **Anais**. São Paulo, Julho 2004, 678-689.
2. WILSON, A.D. **Guidelines for Fabricating and Processing Plate Steel**. Bethlehem-Lukens Plate, Coatesville, 2000, 97 p.
3. KRISHNADEV, M.R. Development of Strong, Tough Structural Steels Based on Copper-High-Silicon Additions. **Metals Technology**, July 1980, 305-306.
4. TAMURA, I. e outros. **Thermomechanical Processing of High Strength Low-Alloy Steels**. Butterworths, London, 1988, 248 p.
5. GORNI, A.A. e outros. Influência dos Elementos de Liga sobre o Efeito da Temperatura na Resistência à Deformação de Aços. In: 61° Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. **Anais**. Rio de Janeiro, Julho 2006, 1499-1507.
6. GORNI, A.A. e outros. Modelling the Effect of Alloy Elements in the Hot Strength of Steel. In: International Conference on Engineering Applications of Neural Networks – EANN '97. **Proceedings**. Stockholm, June 1997, 143-150.
7. 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, 145-154.
8. 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, 1092-1111.
9. GORNI, A.A. e outros. Laminação Ferrítica de Tiras a Quente. In: 41° Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos. **Anais**. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Joinville, Outubro 2004, 610-618.
10. POLUKHIN, P. e outros. **Physical Principles of Plastic Deformation**. Mir Publishers, Moscow, 1983, 480 p.
11. MACCAGNO, T.M. e outros. Determination of T_{nr} from Rolling Mill Logs - Comparison with Laboratory Data. **ISIJ International**, 34:11, November 1994, 917-922.

12. GORNI, A.A. e outros. O Efeito do Boro na Resistência à Deformação a Quente de Aços com Baixo Carbono. In: 42° Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos. **Anais**. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Santos, Outubro 2005, 406-414.
13. SILVA, M.R.S. e outros. Desenvolvimento de Novos Aços Patináveis Laminados a Quente na COSIPA: Cos-Ar-Cor 300 e 350. In: 16th Rolling Conference. **Proceedings**. Instituto Argentino de Siderurgia, San Nicolás, Novembro 2006, 123-130.