

# MODELAMENTO MATEMÁTICO DO EFEITO DOS ELEMENTOS DE LIGA DOS AÇOS SOBRE SUA RESISTÊNCIA À DEFORMAÇÃO A QUENTE <sup>1</sup>

Antonio Augusto Gorni <sup>2</sup>  
Marcos Domingos Xavier <sup>3</sup>  
Pedro Segundo da Silva Vallim <sup>4</sup>  
José Herbert Dolabela da Silveira <sup>5</sup>  
Maurício Domingos Campos Jr. <sup>6</sup>

## RESUMO

A implantação do sistema de automação no Laminador de Tiras a Quente da COSIPA, ora em curso, gerou a necessidade de se caracterizar e modelar matematicamente a resistência à deformação a quente dos aços lá processados. O objetivo deste trabalho foi determinar, através de ensaios de torção a quente isotérmicos, a resistência à deformação a quente das ligas mais representativas do *mix* produtivo, bem como desenvolver modelos matemáticos que permitissem o cálculo desse parâmetro a partir da composição química do aço e das condições de deformação a quente, ou seja, temperatura, grau e velocidade de deformação. A ênfase desse trabalho foi a dedução de um modelo matemático o mais geral possível, permitindo seu uso na previsão da resistência à deformação a quente para as combinações e teores de elementos de liga. Isso foi conseguindo incorporando-se ao modelo o algoritmo de Medina para o cálculo da energia de ativação para a deformação a quente  $Q$ , a qual foi medida a partir de um projeto otimizado de experimentos. Dessa forma podem ser minimizados os erros produzidos pela extrapolação do modelo de cálculo quando são consideradas ligas ligeiramente diferentes das usadas nos ensaios experimentais.

Palavras-Chave: resistência à deformação a quente, composição química, modelo matemático

---

<sup>1</sup> Trabalho a ser apresentado no 56º Congresso da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Belo Horizonte, 16 a 19 de julho de 2001.

<sup>2</sup> Sócio da A.B.M. Analista de Processos da Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP. E-Mail: agorni@iron.com.br

<sup>3</sup> Sócio da A.B.M. Professor da Faculdade de Tecnologia de São Paulo - FATEC-SP, São Paulo SP.

<sup>4</sup> Sócio da A.B.M. Analista de Processos da Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP.

<sup>5</sup> Sócio da A.B.M. Gerente, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP.

<sup>6</sup> Sócio da A.B.M. Assistente Técnico da Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP.

## - INTRODUÇÃO

O modelamento matemático da resistência à deformação a quente dos aços, não só em função dos parâmetros do processo de conformação mecânica (temperatura, grau e velocidade de deformação), como também em função de sua composição química, é uma ferramenta fundamental para os algoritmos dos sistemas de automação em laminadores a quente ou para a execução de simulações *off-line*.

Contudo, o desenvolvimento desse modelo é tarefa bastante complicada. O problema principal não se encontra tanto em sua abordagem matemática; afinal, nos últimos anos, o acesso a microcomputadores e a programas para desenvolvimento e ajuste de modelos, usando-se as mais variadas técnicas estatísticas e matemáticas, tornou-se trivial [1-3]. A grande dificuldade reside no fato de que aços comerciais possuem vários elementos de liga que afetam a magnitude da resistência à deformação a quente. O modelamento desse parâmetro, portanto, deve considerar não só a presença de cada elemento, bem como as diferentes combinações das faixas de seus teores no conjunto de ligas em estudo. Tal fato requer um planejamento experimental criterioso, particularmente no momento da seleção da composição química das ligas a serem estudadas.

Infelizmente nem sempre é possível adotar uma seleção de ligas ideal ao se proceder ao planejamento dos experimentos, particularmente quando o estudo se baseia no *mix* de aços produzidos por uma usina, caso em que há muito pouca flexibilidade para se influir na composição química das ligas a serem estudadas. Neste caso é possível adotar uma solução de compromisso: tomar como base um modelo para cálculo de resistência de deformação a quente deduzido a partir das condições mais ideais possíveis e ajustá-lo aos dados correspondentes a uma situação específica.

Um modelo particularmente adequado para ser adotado como algoritmo básico é o proposto por Medina [4], desenvolvido usando-se dados obtidos a partir de ligas cujas composições químicas foram definidas conforme um planejamento experimental relativamente consistente, alterando-se criteriosamente os teores de C, Si, Mo, Ti, V e Nb. Este modelo permite o cálculo do valor de pico de resistência à deformação a quente ( $\sigma_p$ ) na curva tensão versus deformação obtida durante o ensaio de torção a quente:

$$\sigma_p = \frac{1}{\alpha} \ln \left[ \left( \frac{Z}{A} \right)^{1/n} + \sqrt{\left( \frac{Z}{A} \right)^{2/n} + 1} \right] \quad (1)$$

onde  $\alpha$  e  $n$  são constantes cujos respectivos valores são  $0,011875 \text{ MPa}^{-1}$  e  $4,458$ . Por sua vez  $Z$ , o parâmetro de Zener-Hollomon, pode ser determinado conforme a equação abaixo, em  $s^{-1}$ :

$$Z = \dot{\epsilon} \exp \frac{Q}{R T} \quad (2)$$

onde  $\dot{\epsilon}$  é a velocidade de deformação ( $s^{-1}$ ),  $R$  é a constante dos gases ( $8,31 \text{ J/mol K}$ ) e  $Q$  é a energia de ativação para deformação a quente, expressa em  $\text{J/mol}$ , determinada através da equação

$$Q = 267000 - 2536 C + 1010 Mn + 33620 Si + 35651 Mo + 93680 Ti^{0,5919} + 31673 V + 70730 Nb^{0,5649}$$

(3)

onde os teores dos vários elementos de liga estão expressos em percentagem em peso. Finalmente, o parâmetro **A**, expresso em  $s^{-1}$ , pode ser calculado pela fórmula

$$A = (12,197 + 65,590 C - 49,052 Nb) \exp(7,076 \times 10^{-5} Q) \quad (4)$$

Esse modelo foi ajustado aos dados de resistência à deformação a quente obtidos através de ensaios de torção a quente para os principais aços processados no Laminador de Tiras a Quente da COSIPA, conforme será descrito a seguir.

## - DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Foram selecionados para este trabalho os doze aços com maior participação no *mix* de produção do Laminador de Tiras a Quente da COSIPA, cujas composições químicas podem ser vistas na tabela I. As amostras destinadas à usinagem dos corpos de prova para torção a quente foram extraídas de placas destinadas à laminação, a  $\frac{1}{4}$  de sua largura e  $\frac{1}{4}$  da espessura. Dessa forma descarta-se a região central da placa, que tende a ser mais segregada em função das condições peculiares durante a solidificação do veio no lingotamento contínuo.

O eixo longitudinal dos corpos de prova de torção ficou paralelo à direção de laminação do esboço. Foram usados dois tipos de corpos de prova de torção. Os destinados a ensaios sob velocidade de deformação de até  $10 s^{-1}$  possuíam seção útil com diâmetro de 6,35 mm e comprimento de 15,0 mm, enquanto que os usados nos ensaios com velocidade de deformação de  $50 s^{-1}$  possuíam o mesmo diâmetro, mas comprimento de apenas 2,0 mm. As dimensões características deste último tipo de corpo de prova permitem que sejam alcançadas altas velocidades de deformação dentro dos limites máximos da velocidade de rotação da máquina de torção a quente.

Aço	C	Mn	Si	P	S	Al	Cu	Cr	Nb	V	Ti
C1	0,02	0,26	-	0,008	0,015	0,003	-	-	-	-	-
C2	0,09	0,42	-	0,017	0,010	0,041	-	-	-	-	-
C3	0,14	0,46	-	0,022	0,008	0,045	-	-	-	-	-
CSi1	0,10	0,48	0,23	0,013	0,013	0,019	-	-	-	-	-
CSi2	0,17	0,81	0,19	0,016	0,019	0,033	-	-	-	-	-
CSi3	0,49	0,80	0,20	0,018	0,011	0,015	-	-	-	-	-
CuCr	0,14	1,02	0,27	0,026	0,005	0,027	0,25	0,44	-	-	-
Nb1	0,12	0,59	-	0,009	0,010	0,072	-	-	0,012	-	-
Nb2	0,16	0,77	-	0,025	0,008	0,058	-	-	0,014	-	-
Nb3	0,07	0,69	-	0,011	0,012	0,066	-	-	0,042	-	-
NbTi	0,11	1,28	0,27	0,022	0,008	0,042	-	-	0,053	-	0,015
NbTiV	0,13	1,35	0,29	0,030	0,004	0,034	-	-	0,050	0,038	0,024

Tabela I: Composições químicas dos aços estudados.

Os ensaios isotérmicos de torção a quente foram executados no Departamento de Engenharia Metalúrgica da UFMG, adotando-se o procedimento descrito a seguir. Em primeiro lugar, austenitização a  $1200^{\circ}C$  em forno aquecido por lâmpadas sob atmosfera de argônio, seguido de encharque sob essa temperatura por 900 segun-

dos. A seguir os corpos de prova eram resfriados sob uma taxa de 1°C/s até a temperatura de deformação, que foi igual a 1150, 1050, 950 ou 850°C, sendo mantidos nesta temperatura por mais 180 segundos. A seguir era aplicada a deformação, sob uma taxa de deformação constante, até um grau de deformação total de 5,0 ou a ruptura do corpo de prova. Os valores de taxa de deformação adotados foram de 0,1, 1,0, 10 e 50 s<sup>-1</sup>.

Os dados relativos a esses ensaios foram gravados em arquivos compatíveis com a planilha eletrônica Excel ® para facilitar o traçado de curvas e o processamento matemático dos resultados.

## - RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

O ajuste dos valores reais da resistência à deformação a quente máxima, velocidade de deformação e composição química dos aços deste estudo ao modelo já exposto de Medina [4] resultou numa equação linear para adequação do modelo original:

$$\sigma_p^c = a + b \sigma_p \quad (5)$$

onde  $\sigma_p$  é o valor de resistência à deformação de pico, calculado pela equação (1) [4], **a** e **b** são constantes obtidas através de regressão estatística linear e  $\sigma_p^c$  é o valor corrigido de resistência à deformação a quente de pico em função dos dados experimentais obtidos neste trabalho. O coeficiente de correlação  $r^2$  obtido foi satisfatório, 0,91, com erro padrão da estimativa igual a 31 MPa. A figura 1 mostra graficamente uma comparação entre os valores reais e os calculados por essa equação.

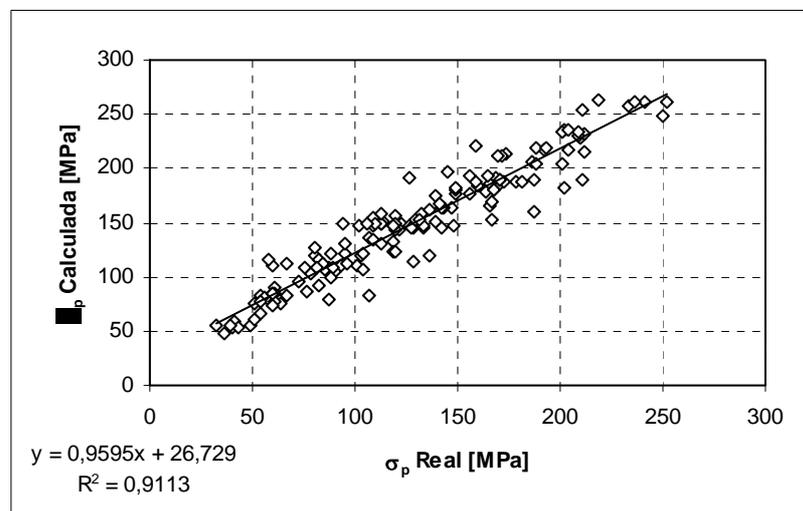


Figura 1: Comparação entre os valores de pico de resistência à deformação a quente reais e os calculados pelo modelo de Medina, juntamente com a reta de regressão obtida.

Esta abordagem, contudo, apresenta alguns inconvenientes. Ela não inclui como variável o grau de deformação aplicado ao aço, que neste caso é constante e é igual ao valor que corresponde ao pico da resistência à deformação a quente. Isto

inviabiliza seu uso no cálculo de cargas de laminação, que é fundamental para a determinação do esquema de passes e que, por sua vez, é uma etapa imprescindível nos algoritmos de automação dos laminadores a quente.

A solução para esse problema consistiu em se usar a equação (3), deduzida por Medina [4], para o cálculo do valor da energia de ativação  $Q$  necessário para o modelo para cálculo de resistência à deformação a partir da temperatura, grau e velocidade de deformação, proposto por Collinson [5]:

$$\sigma = \frac{\varepsilon^n}{\alpha} \sinh^{-1} \left\{ \left[ c \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \right]^m \right\} \quad (6)$$

onde  $c$ ,  $m$ ,  $n$  e  $\alpha$  são constantes determinadas empiricamente. O modelo apresentou resultados satisfatórios:  $r^2$  igual a 0,89 e erro padrão da estimativa de 19 MPa, bem menor que o observado para o modelo ajustado de Medina para cálculo do valor de pico da resistência a deformação a quente.

Contudo, uma análise mais detalhada dos erros associados ao modelo híbrido de Collinson-Medina mostrou que eles foram significativamente maiores para o aço C1 quando o ensaio de torção foi efetuado a 850°C. Neste caso específico eles atingiram valores altíssimos, de até 900%, quando o erro médio do modelo flutuou em torno de 15%. Um exame das curvas de torção a quente para esse aço obtidas a 850°C revelou, surpreendentemente, uma queda nos valores de pico da resistência à deformação a quente em relação aos valores obtidos a 950°C. Esta ocorrência parece indicar que a transformação austenita  $\rightarrow$  ferrita já estaria ocorrendo a 850°C, suspeita essa reforçada pelo teor extra-baixo de carbono do aço C1: 0,02%. É possível efetuar o cálculo da temperatura de início da transformação ferrítica ( $Ar_3$ ) a partir da composição química e taxa de resfriamento usando-se a equação proposta por Ouchi [6],

$$Ar_3 = 910 - 310 C - 80 Mn - 20 Cu - 15 Cr - 55 Ni - 80 Mo + 0,35 (h - 8) \quad (7)$$

onde  $Ar_3$  é dada em °C, o teor de elementos de liga está expresso em percentagem em peso e  $h$  é a espessura da chapa em mm. Conforme mostrado na tabela II, o valor de  $Ar_3$  calculado para o aço C1 é igual a 889°C - de fato, bem acima da temperatura mínima aplicada nos ensaios de torção; os valores para os demais aços estão bem abaixo de 850°C, exceto para os aços C2 e CSi, que foram iguais a 855 e 846°C respectivamente.

Aço	$Ar_3$
C1	889
C2	855
C3	837

Aço	$Ar_3$
CSi1	846
CSi2	797
CSi3	701

Aço	$Ar_3$
Nb1	832
Nb2	804
Nb3	840

Aço	$Ar_3$
CuCr	763
NbTi	779
NbTiV	766

Tabela II: Valores de temperatura  $Ar_3$  expressos em °C e calculados pela equação de Ouchi para as ligas deste estudo.

Como se sabe, nos processos de conformação efetuados sob temperatura decrescente ocorre um súbito amaciamento imediatamente após a temperatura ultrapassar o ponto  $Ar_3$ . Isso decorre do fato de a ferrita então formada ser

mais macia que a austenita que lhe deu origem [7]. Tal fato deve ser levado em conta no modelo para cálculo da resistência a quente, que passou a ser feito de acordo com a seguinte abordagem:

- a) Cálculo do valor básico da resistência à deformação a quente  $\sigma_{bas}$  conforme o modelo híbrido de Collinson-Medina, já descrito anteriormente;
- b) Cálculo da temperatura  $Ar_3$ ;
- c) Caso a temperatura de deformação considerada for menor que  $Ar_3$ , multiplicar  $\sigma_{bas}$  por um fator de correção **g**.

A literatura oferece algumas opções para o cálculo empírico da temperatura  $Ar_3$ . Uma delas já foi vista: é a equação (7), proposta por Ouchi [6]. Outros autores propuseram fórmulas para cálculo desse parâmetro dentro de modelos para cálculo da resistência à deformação a quente inclusive dentro da região intercrítica. Temos assim a fórmula proposta por Shida [8], em função do teor de C, que expressa  $Ar_3$  em graus Kelvin:

$$Ar_3 = 950 \frac{C + 0,41}{C + 0,32} \quad (8)$$

Misaka [9], por sua vez, tabulou valores das temperaturas de início ( $Ar_3$ ) e fim ( $Ar_1$ ) da transformação ferrítica durante o resfriamento da austenita em função do teor de carbono, os quais podem ser calculados através das seguintes equações lineares:

$$Ar_3 = 974,76 - 734,65 C \quad (9)$$

$$Ar_1 = 876,81 - 336,26 C \quad (10)$$

Os valores gerados por essas duas equações estão expressos em °C. A figura 3 mostra graficamente os valores de  $Ar_3$  e  $Ar_1$  calculados pelos diversos modelos, bem como as retas obtidas através de regressão para os valores propostos por Misaka [9].

Também os valores de **g** podem ser calculados por diversas formas. Shida [8] propôs a seguinte equação, em função da temperatura (em graus Kelvin) e do teor de C (percentagem em peso):

$$g = 30 (C + 0,90) \left( \frac{T}{1000} - 0,95 \frac{C + 0,49}{C + 0,42} \right)^2 + \frac{C + 0,06}{C + 0,09} \quad (11)$$

Já Misaka [9] igualmente tabulou valores de **g** em função apenas do teor de C, em percentagem em peso, que podem ser expressos através da fórmula

$$g = 0,7893 + 0,769 C \quad (12)$$

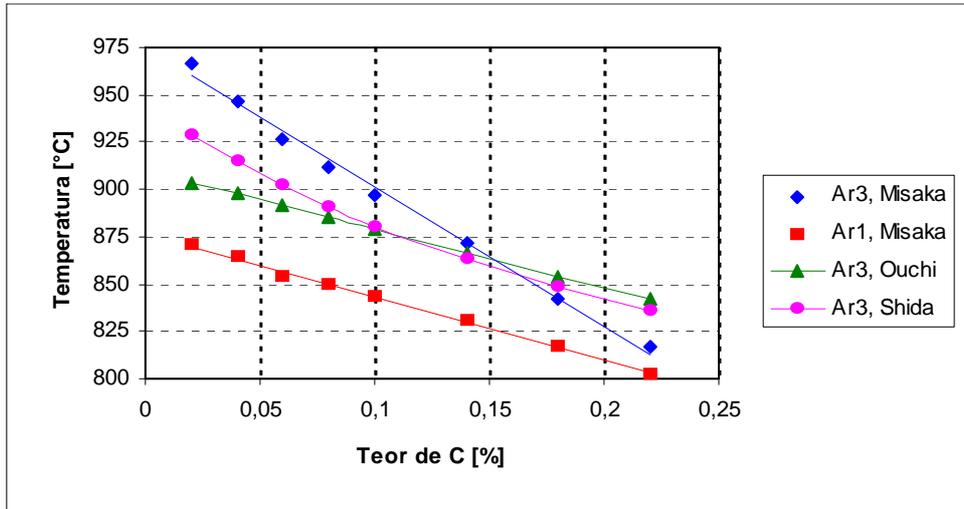


Figura 3: Comparação gráfica entre os valores das temperaturas  $Ar_3$  e  $Ar_1$  propostos pelos modelos de Misaka, Ouchi e Shida. Considerou-se aqui apenas o efeito do C no modelo de Ouchi.

Neste caso, para valores de temperatura de deformação abaixo de  $Ar_1$ , o valor de  $g$  passa a ser unitário. A figura 4 mostra os valores do coeficiente de correção  $g$  para os modelos de Shida e Misaka.

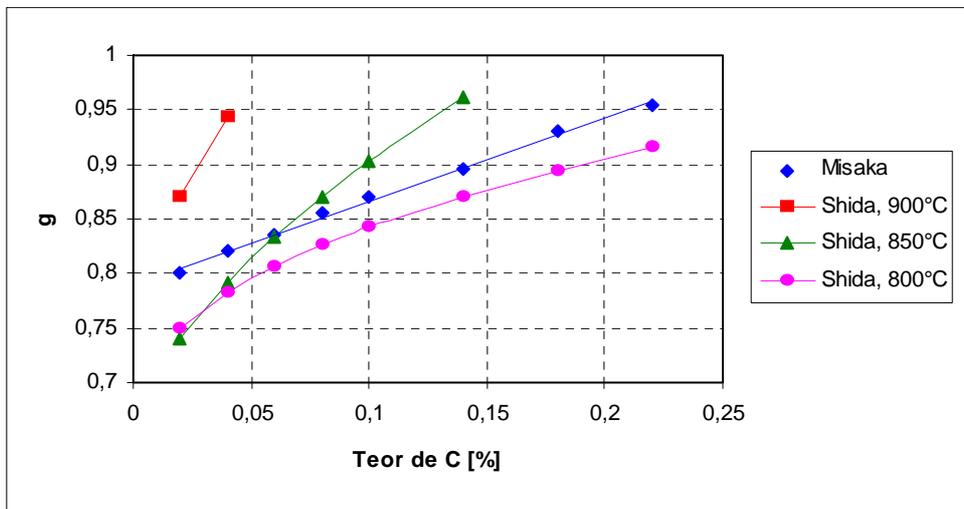


Figura 4: Valores do coeficiente  $g$  para correção dos valores de resistência à deformação a quente na região intercrítica, calculados conforme os modelos de Misaka e Shida.

Os dados experimentais provenientes dos ensaios de torção a quente foram usados para ajustar essa nova abordagem, sendo usadas as diversas equações para cálculo de  $Ar_3$  e  $g$  aqui descritas. Os resultados obtidos podem ser vistos na tabela III. Como se pode observar, as várias equações propostas apresentaram nível de ajuste semelhante, mas a melhor combinação foi o uso do modelo híbrido de Collinson-Medina usando-se a equação de Ouchi para o cálculo de  $Ar_3$  e

a de Shida para a determinação de  $g$ .

Os níveis de ajuste apresentados tanto pelo modelo para cálculo do valor de pico da resistência à deformação a quente baseado no modelo de Medina quanto o modelo híbrido de Collinson-Medina-Ouchi-Shida foram considerados apropriados para os estudos preliminares referentes à automação do Laminador de Tiras a Quente da COSIPA.

Equação de $Ar_3$	Equação de $g$	$r^2$	E.P.E. [MPa]
Misaka	Misaka	0,88	20
Ouchi	Misaka	0,91	18
Shida	Shida	0,89	19
Ouchi	Shida	0,91	17

Tabela III: Grau de ajuste das diversas variantes do modelo de Collinson-Medina, usando diversas equações para cálculo de  $Ar_3$  e  $g$ , em relação aos dados experimentais de resistência à deformação a quente obtidos neste trabalho.

## - CONCLUSÕES

O desenvolvimento deste trabalho sobre o modelamento matemático da resistência à deformação a quente de aços em função de sua composição química e parâmetros de deformação permitiu chegar às seguintes conclusões:

- ⇒ A necessidade de se obter modelos matemáticos que apresentem resultados confiáveis para uma larga faixa de teores e combinações de elementos de liga requer planejamento experimental cuidadoso, com seleção adequada do tipo, combinações e teores dos elementos de liga, bem como das condições de conformação;
- ⇒ Trabalhos efetuados com ligas industriais dificilmente atenderão plenamente aos requisitos expostos no parágrafo anterior, tornando aconselhável a adaptação a partir de modelos matemáticos disponíveis na literatura que tenham sido desenvolvidos a partir das condições experimentais mais apropriadas;
- ⇒ Esta abordagem foi particularmente bem sucedida neste trabalho, onde dados experimentais de resistência à deformação a quente referentes aos aços de maior participação no *mix* produtivo do Laminador de Tiras a Quente da COSIPA foram usados para se ajustar o modelo de Medina, que permite o cálculo do valor de pico das curvas resistência à deformação x grau de deformação para cada valor de velocidade de deformação considerado;
- ⇒ Da mesma forma, pode-se calcular a resistência à deformação a quente a partir da composição química, temperatura, grau e velocidade de deformação através do modelo de Collinson. O valor de  $Q$  requerido por este modelo é determinado pelo modelo de Medina, permitindo levar em conta a composição química do aço. Pode-se ainda estender o campo de validade desse modelo, que foi desenvolvido para aços no estado austenítico, para o campo intercrítico, usando-se as

equações de Ouchi e Shida para corrigir o valor originalmente obtido pela combinação das equações de Collinson-Medina.

⇒ Os resultados obtidos pelo modelo híbrido de Collinson-Medina-Ouchi-Shida foram considerados satisfatórios para uso na classificação de aços conforme seu grau de resistência quente que será usada durante a implantação da automação do Laminador de Tiras a Quente da COSIPA.

## - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. GORNI, A.A. & CAVALCANTI, C.G. In: II Congresso Internacional de Tecnologia Metalúrgica e de Materiais, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo, Outubro de 1997.
2. LENARD, J.G. e outros. Mathematical and Physical Simulation of the Properties of Hot Rolled Products. Elsevier Science Ltd., Oxford, 1999. 364 p.
3. LENARD, J.G. (editor). Modelling Hot Deformation of Steels. Springer-Verlag, Berlin, 1989. 232 p.
4. MEDINA, S.F. & HERNANDEZ, C.A. Acta Materialia, vol. 44, n. 1, 1996, p. 137-148.
5. COLLINSON, D.C. e outros. In: Mathematical Modelling of Steel Rolling. Proceedings. The Materials Society, London, 1993, 283-295.
6. OUCHI, C. e outros. Transactions of the ISIJ, May 1982, 214-222.
7. KASPAR, R. e outros. Steel Research, Mai 1983, 195-198.
8. SHIDA, S. Hitachi Report, 1974, 23 p.
9. MISAKA, O. e outros. Tetsu-to-Hagané, 1981, A53.

## **- ABSTRACT**

### **MATHEMATICAL MODELLING OF THE EFFECT OF ALLOYING ELEMENTS OVER STEEL HOT STRENGTH**

The implementation of the automation system of COSIPA Hot Strip Mill, that is being carried out right now, required the characterization and mathematical modelling of the hot strength of steels that are processed in that line. The aim of this work was twofold: first, to determine the hot strength of the most representative steels of the Hot Strip Mill productive mix through isothermal hot torsion tests; second, the development of faithful mathematical models that can calculate steel hot strength from the forming parameters (temperature, strain degree and strain rate) and its chemical composition. The main concern about such model is its applicability range, specially regarding chemical composition. In order to maximize its flexibility the Medina algorithm for calculation of the hot forming activation energy  $Q$  was used in association with the hot strength model of Collinson. Medina equation was developed using an optimized design experiment of alloy steels, which can extend the application range of the model here developed and minimize the unavoidable errors that arise when this model is used for steel alloys slightly different from those used in the original experiments.

Keywords: steel hot strength, alloy elements, mathematical model