

EFEITO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA NA RESISTÊNCIA À DEFORMAÇÃO A QUENTE DE AÇOS DE BAIXO CARBONO ¹

Antonio Augusto Gorni ²
Pedro Segundo da Silva Vallin ³

RESUMO

Os diversos trabalhos já desenvolvidos pela COSIPA para caracterizar a resistência à deformação a quente de seus aços e estabelecer correlações com suas composições químicas foram feitos em escala laboratorial. As conclusões obtidas não se mostraram totalmente confiáveis para uso industrial, em função da pequena quantidade de ligas estudadas, que não permitiu caracterizar plenamente o efeito dos elementos de liga nessa propriedade. Decidiu-se então estender esse estudo aos dados obtidos em escala industrial, o que permite aumentar sobremaneira a quantidade de dados disponíveis, ainda que neste caso não seja possível fixar os parâmetros de conformação usados, ao contrário do que ocorre nos ensaios laboratoriais. O estudo de subconjuntos criteriosamente extraídos da massa de dados obtida, análises por correlação múltipla *stepwise* e o ajuste dos dados às equações de Misaka revelaram que os principais elementos de liga que afetam a resistência à deformação a quente são o C, Nb, Si, Cr e Mn, em ordem decrescente de importância, sendo que apenas o C exerce efeito no sentido de se reduzir o valor desse parâmetro. O aumento do grau de deformação levou à redução nos valores de resistência à deformação a quente. Tal fato aparentemente indica a ocorrência de recristalização dinâmica durante a laminação do esboço na cadeira F1 do trem acabador do laminador de tiras a quente.

Palavras-Chave: Resistência à Deformação a Quente, Composição Química, Modelo Matemático

¹ Trabalho a ser apresentado ao 59º Congresso Anual da ABM, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo SP, 19 a 22 de Julho de 2004.

² 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.

³ Engenheiro Mecânico, Analista de Processos da Gerência de Suporte Técnico da Laminação a Quente, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP.

- INTRODUÇÃO

Em meados da década de 1990 a COSIPA desenvolveu trabalhos para caracterizar a resistência à deformação a quente de seus aços através de ensaios de torção, visando fornecer subsídios para os modelos matemáticos dos sistemas de automação que seriam implantados em seus laminadores. Um dos objetivos dessa caracterização era determinar a influência dos elementos de liga sobre essa propriedade.

O primeiro trabalho com essa finalidade, analisando alguns dos principais aços processados na linha de chapas grossas [1], demonstrou que era virtualmente impossível a obtenção de um modelo matemático totalmente generalizado para cálculo da resistência à deformação a quente a partir da composição química, uma vez que as ligas industriais apresentavam faixas de composição química muito específicas, as quais geravam modelos tendenciosos e de aplicação restrita.

Do ponto de vista ideal, um estudo estatístico de correlação múltipla consiste em se verificar e quantificar as relações entre uma variável dependente (no caso, a resistência à deformação a quente) e um conjunto de variáveis que devem ser totalmente independentes entre si (os teores de elementos de liga e os parâmetros de laminação ou ensaio de conformação a quente). O problema é que as composições químicas de aços comerciais são concebidas de acordo com as características que o cliente deseja do produto final, fazendo com que as variações entre os teores dos diferentes elementos de liga deixem de ser aleatórias. Por exemplo, foi constatado que os aços estudados em [1] apresentavam teores de Mn e Nb que eram diretamente proporcionais aos de C. Isso tornou o modelo obtido para cálculo da resistência a quente inadequado para uso em certas situações como, por exemplo, aços de alto carbono e baixos teores de Mn e Nb, e vice-versa. Logo, rigorosamente falando, neste caso os teores dos elementos de liga não podem ser considerados como variáveis independentes. Uma abordagem ideal exigiria o estudo de muitas ligas, cujos teores de elementos de liga seriam definidos de forma plenamente matricial, evitando o estabelecimento de correlações entre eles. Infelizmente isso tornaria o estudo muito caro e fora do escopo industrial.

Um segundo desenvolvimento, envolvendo os principais aços processados na linha de tiras a quente da COSIPA [2], assumiu outra abordagem: o modelamento matemático do efeito dos elementos de liga foi feito ajustando-se os dados obtidos na COSIPA a uma equação pré-definida por Medina & Hernandez [3] a partir de ligas cuja composição química foi definida de forma mais criteriosa. Este modelo considera que o C abaixa a resistência à deformação a quente do aço, enquanto que o Mn, Si, Mo e V a aumentam moderadamente e Ti e Nb a elevam de forma significativa.

As informações conflitantes da literatura e a natureza laboratorial desses resultados levantaram dúvidas acerca da sua representatividade no ambiente industrial. Por esse motivo decidiu-se desenvolver um novo trabalho usando dados industriais provenientes do Laminador de Tiras a Quente. Este tipo de estudo, analisando os fenômenos metalúrgicos diretamente dos dados obtidos industrialmente, vem sendo favorecido pela redução de custo e aumento da sofisticação dos sistemas de coleta de informações e seu armazenamento em bases de dados. Dessa forma torna-se possível a determinação dos valores de resistência à deformação a quente observados sob tais condições e verificar quais as correlações que ocorrem entre essa propriedade, a composição química do aço e os parâmetros de processo nas condições em que os modelos matemáticos seriam efetivamente empregados.

- PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O ajuste dos modelos matemáticos disponíveis no sistema de automação do trem acabador do laminador de tiras a quente da COSIPA requereu a coleta de grande número de dados industriais, incluindo a composição química do material processado e dados completos sobre o esquema de passes empregado. Essa massa de dados serviu para a determinação do valor da resistência à deformação a quente do material. Primeiramente ela foi analisada para se detectar a ocorrência de dados espúrios, os quais foram eliminados. A seguir, uma vez que 90% do material processado era aço ao carbono comum, foi feita uma concentração dos dados, visando uniformizar a quantidade de dados correspondente a cada liga. O novo conjunto assim obtido continha dados de todas as laminações de aços IF, de baixa liga (ou seja, que satisfaçam quaisquer das seguintes condições: $C \geq 0,15\%$, $Mn \geq 0,75\%$, $Si \geq 0,30\%$, $Cu \geq 0,10\%$, $Cr \geq 0,10\%$, $B \geq 0,0009\%$) e microligados (Nb, Ti ou $V \geq 0,008\%$), mais 10% dos dados relativos a aços ao carbono comuns; estes últimos foram escolhidos aleatoriamente. Tal procedimento gerou uma massa de dados com um total de 5.498 registros.

O cálculo da resistência à deformação foi feito baseando-se no procedimento descrito em [4]: 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, caso a geometria do passe indicar essa situação; 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. Foi determinado apenas o valor relativo à primeira cadeira do trem acabador (F1), evitando-se dessa maneira eventuais efeitos decorrentes de efeitos de recristalização ou encruamento no intervalo de tempo decorrido entre passes, bem como eventuais tensionamentos provocados pelos *loopers*.

Conseguiu-se dessa forma a obtenção de uma massa de dados com aproximadamente 5300 registros, cada um deles relativo a um passe aplicado na cadeira F1, contendo os valores de resistência à deformação a quente, composição química, temperatura, grau e velocidade de deformação associados. As análises descritas a seguir foram feitas a partir dessa massa de dados.

- RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

Em primeiro lugar procurou-se determinar o efeito isolado dos elementos de liga sobre a resistência à deformação a quente. A quantidade relativamente grande da massa de dados obtida permitiu o uso de uma técnica rudimentar de *data mining*: foram selecionados alguns elementos de liga e obtidos subconjuntos de dados, fixando-se em cada caso as demais variáveis dentro de faixas relativamente estreitas. Dessa forma pode-se assumir que os valores das demais variáveis tenham ficado praticamente constantes. A análise estatística desses subconjuntos permite determinar com maior clareza o efeito do elemento de liga selecionado sobre a resistência à deformação a quente. Foi possível criar tais subconjuntos no caso do C, Mn, Si, Nb e Cr; para os demais elementos os subconjuntos encontrados foram muito pequenos para permitir uma análise con-

fiável. As condições de processo foram similares para todos os elementos, uma vez que se restringiu a análise à cadeira F1 do trem acabador do laminador de tiras a quente.

Os resultados obtidos estão mostrados na tabela I. Pode-se observar a partir daí que o aumento do teor de C reduziu a resistência à deformação a quente, confirmando os resultados obtidos em [3,5]. De fato, há evidências de que a presença desse elemento ativa os mecanismos de amaciamento do aço [5]. Os demais elementos de liga aumentaram a resistência a quente do material, com a seguinte ordem decrescente de efeito: Nb, Cr, Si e Mn. O efeito do Nb é cinco a dez vezes superior ao dos demais elementos de liga, mas seu teor no aço é bem menor. O efeito aqui verificado para o Cr não deriva só desse elemento, mas também do Cu, já que o todo aço ao Cr nessa massa de dados particular obrigatoriamente contém também Cu. Este resultado está de acordo com a equação proposta por Medina & Hernandez [3]:

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

que mostra o forte efeito do Nb sobre a energia de ativação da deformação a quente (que é diretamente proporcional à sua resistência à deformação a quente), seguido do Mn e Si, bem como o efeito de amaciamento promovido pelo C.

Elemento e Faixa Analisada	Restrições	Equação de Regressão
C 0,05 ~ 0,50%	Aços ao C $0,60 \leq Mn \leq 0,80$ $0,20 \leq Si \leq 0,30$	$\sigma = 163 - 84,5 \%C$ $r = -0,53$
Nb 0,000 ~ 0,035%	Aços ao Nb $0,05 \leq C \leq 0,15$ $0,40 \leq Mn \leq 0,60$ $0,00 \leq Si \leq 0,10$	$\sigma = 123 + 289 \%Nb$ $r = 0,20$
Cr (Cu) 0,00 ~ 0,55%	Aços ao Cr-Cu $0,05 \leq C \leq 0,15$ $0,40 \leq Mn \leq 0,60$ $0,00 \leq Si \leq 0,10$	$\sigma = 121 + 48,6 \%Cr$ $r = 0,57$
Si 0,00 ~ 0,45%	Aços ao C $0,025 \leq C \leq 0,075$ $0,25 \leq Si \leq 0,40$	$\sigma = 121 + 25,0 \%Si$ $r = 0,24$
Mn 0,4 ~ 1,6%	Aços ao C $0,20 \leq C \leq 0,25$ $0,15 \leq Si \leq 0,25$	$\sigma = 123 + 11,6 \%Mn$ $r = -0,30$

Tabela I: Efeito isolado de alguns elementos de liga sobre a resistência à deformação a quente para condições específicas de composição química ao aço.

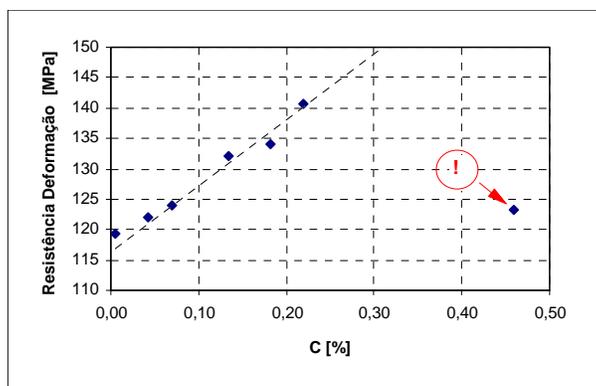
Este primeiro resultado sugere então que a resistência à deformação a quente dos aços IF deveria ser maior que a dos demais aços. Não é isso o que acontece, devido à intervenção de outros fatores, como será visto a seguir.

Os dados da tabela II mostram o que ocorre com a resistência à deformação a quente à medida que o teor de carbono é elevado, considerando-se apenas aços IF e ao C-Mn-Si. Na verdade ocorre exatamente o contrário: a resistência à deformação a quente (σ) é mínima para os aços IF, conforme mostra o gráfico (a) da figura 1: a resistência à deformação a quente parece ser proporcional ao teor de C do aço para valores de até 0,25%, mas o valor observado para teores da ordem de 0,43% de C é bem mais baixo. A explicação para este fato está no gráfico (b): os valores da resistência à deformação a quente apresentam boa correlação com o termo resultante da soma dos teores de Mn e Si e da subtração do teor de C. Isto confirma os resultados que já haviam sido obtidos na tabela I. Ou seja, o aumento na resistência à deformação a quente com o teor de C observado no gráfico (a) da figura 1 não se deve à ação desse elemento, mas sim dos maiores teores de Mn e Si associados aos aços com teor de C mais elevado. Observa-se no gráfico (c) da figura 1 que nos aços processados no Laminador de Tiras a Quente da COSIPA há uma nítida correlação entre seu teor de C e a soma dos seus teores de Mn e Si. Essa mesma figura apresenta um fato bastante interessante: note-se que uma elevação do teor de C de 0,20 para 0,45%, mantendo-se o valor da soma Mn+Si constante, levou a uma redução do valor de resistência à deformação a quente observado na cadeira F1, de 137 para 123 MPa, o que demonstra o efeito amaciante do C.

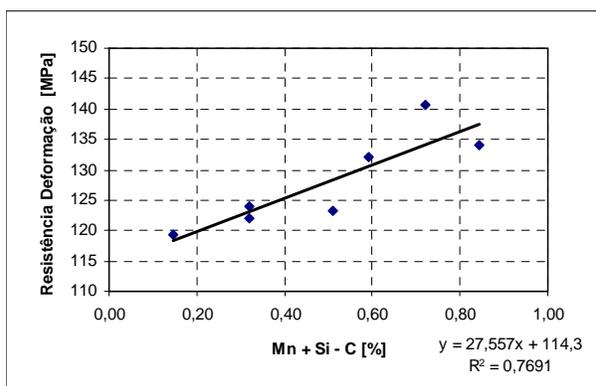
Faixa de C [%]		Mn	Si	T	ε	$\dot{\varepsilon}$	σ
Mínima	Máxima	[%]	[%]	[°C]		[s ⁻¹]	[MPa]
0,000	0,005	0,14	0,01	1082	0,71	9,2	119
0,006	0,050	0,27	0,09	1057	0,73	10,0	122
0,051	0,100	0,33	0,06	1050	0,71	9,6	124
0,101	0,150	0,63	0,09	1039	0,64	9,4	132
0,150	0,200	0,87	0,16	1042	0,64	9,1	134
0,201	0,250	0,85	0,09	1045	0,56	6,9	141
0,430	0,480	0,72	0,25	1054	0,69	10,0	123

Tabela II: Evolução da resistência à deformação a quente na cadeira F1 do Trem Acabador, teores de Mn e Si e temperatura (T), grau (ε) e velocidade ($\dot{\varepsilon}$) de deformação à medida que se eleva o teor de C do aço.

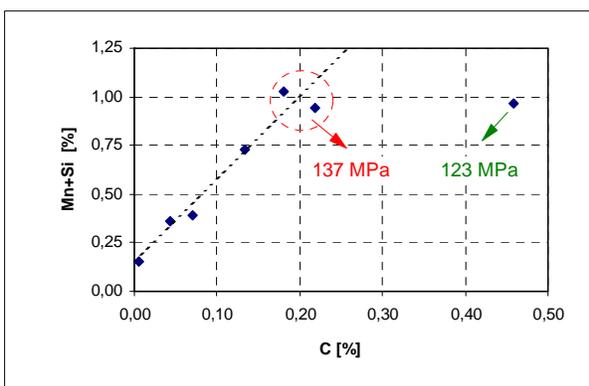
Este resultado confirma a dificuldade em se determinar o efeito isolado dos elementos de liga sobre a resistência à deformação a quente a partir de resultados obtidos em ligas industriais: a correlação entre a soma Mn+Si com o teor de C mascara o efeito real desse último elemento, com o efeito do Mn e Si se sobrepondo a ele.



(a)



(b)



(c)

Figura 1: a) Evolução da resistência à deformação a quente em função do teor de C, mas sem se manter os teores de Mn e Si constantes; b) Relação entre a resistência à deformação a quente e o parâmetro resultante da soma dos teores de Mn e Si subtraídos do teor de C; c) Relação entre o teor de C e da soma dos teores de Mn e Si nos aços estudados.

As condições de conformação expostas na tabela II permitem verificar que também elas influenciam os resultados obtidos. O fato dos aços IF terem sido laminados na cadeira F1 sob uma temperatura um pouco maior do que a dos demais aços (1082°C contra 1039~1057°C) certamente contribuiu para que seus valores de resistência à deformação a quente terem sido os menores da série. No caso dos aços com teor de C entre 0,20 e 0,25% pode-se observar que sua temperatura média de laminação foi uma das mais baixas da série (1045°C), enquanto que seu grau (ϵ) e velocidade ($\dot{\epsilon}$) de deformação apresentaram valores mínimos, 0,56 e 6,9 s⁻¹, respectivamente. Todos esses fatores levaram ao aumento da resistência à deformação a quente, conforme mostram os gráficos (a), (b) e (c) da figura 2. O fato da diminuição do grau e velocidade de deformação ter reduzido a resistência à deformação a quente à primeira vista parece ser surpreendente mas, na verdade, é uma ocorrência comum nas primeiras cadeiras do trem acabador do laminador de tiras a quente ao se processar aços ao C-Mn, em função das condições peculiares de conformação lá aplicadas: temperaturas e graus de

deformação altos associados com velocidades de deformação relativamente baixas [6]. Sob tais condições ocorre a recristalização dinâmica do material, levando à seu amaciamento instantâneo. O grau de deformação geralmente empregado nessa cadeira se situa na região posterior ao valor de pico na resistência à deformação a quente, conforme se pode observar na evolução da curva desse parâmetro versus o grau de deformação, mostrada no gráfico (d) da figura 2.

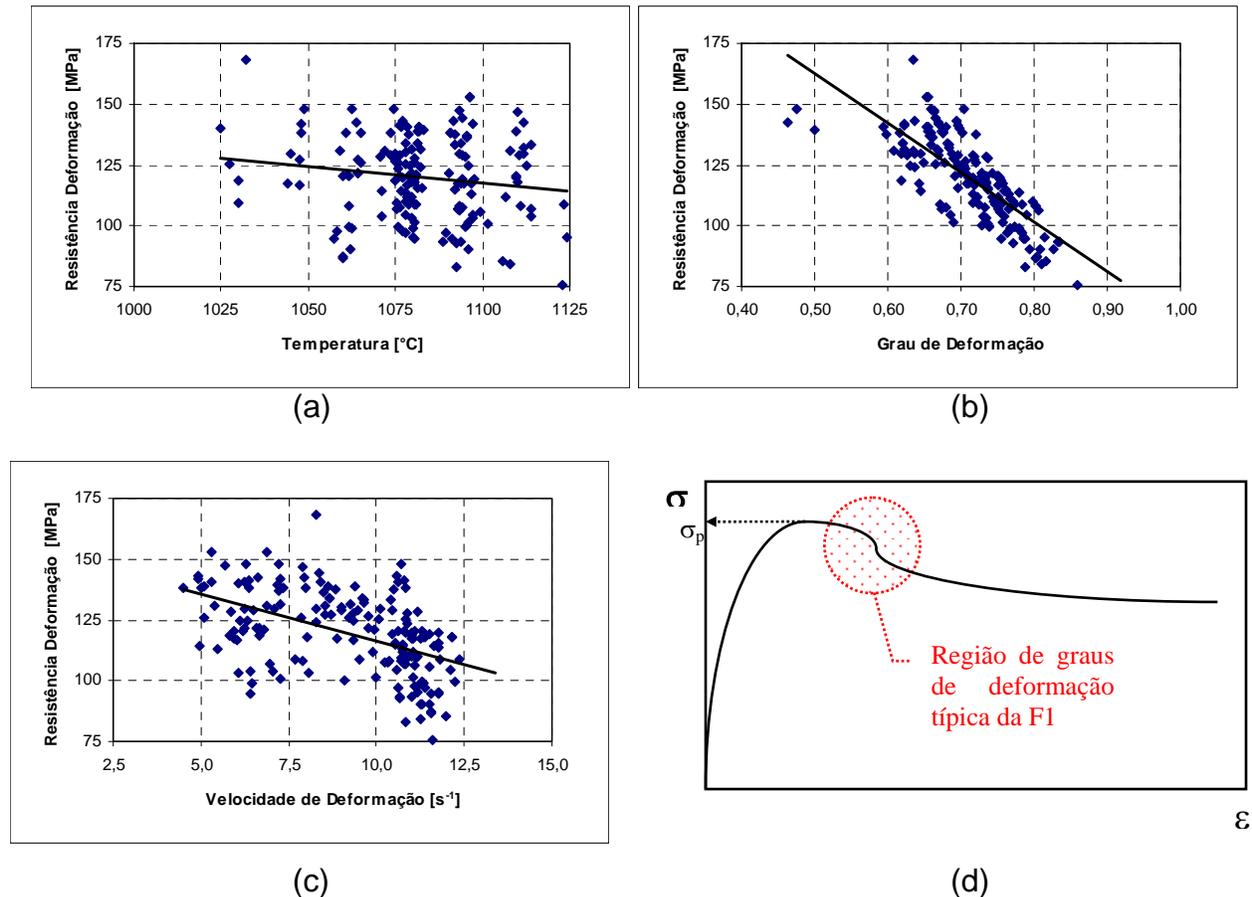


Figura 2: Efeito de vários parâmetros de deformação sobre o valor da resistência mecânica a quente do material: a) temperatura; b) grau de deformação; e c) velocidade de deformação. O gráfico (d) mostra esquematicamente a região da curva tensão x deformação que corresponde às condições de processo na cadeira F1 do trem acabador do LTQ, onde ocorre recristalização dinâmica e o conseqüente amaciamento instantâneo do material.

É necessário o desenvolvimento de uma equação para cálculo da resistência à deformação a quente geral, em função da composição química e dos parâmetros de conformação, para que os modelos matemáticos associados ao sistema de automação do trem acabador possam calcular as cargas de laminação das cadeiras e, dessa forma, estabelecer o melhor esquema de passes. Decidiu-se fazer o ajuste da consagrada equação de Misaka [7] aos dados aqui obtidos. O efeito do C foi levado em conta

conforme a formulação matemática proposta por esse modelo, ainda que com as respectivas constantes ajustadas para os dados da COSIPA. O efeito dos demais elementos de liga foi incluído através de um fator de correção que multiplica o valor calculado pela fórmula de Misaka ajustada. A escolha dos elementos de liga a serem incluídos neste fator de correção foi feita através de correlação múltipla linear do tipo *stepwise*, que apontou como elementos mais significativos Mn, Si, Nb e Cr. Essa equação foi ajustada a partir dos dados coletados na cadeira acabadora F1 do trem acabador do laminador de tiras a quente da COSIPA, usando-se o método de correlação não-linear *Quasi-Newton* disponível no *software Statistica*, obtendo-se o seguinte resultado:

$$\sigma_{F1} = f e^{\left(1575 - 0,243 \% C + \frac{1997}{T}\right)} \varepsilon^{-0,324} \cdot \varepsilon^{-0,119}$$

$$f = 6,407 + 0,241 \% Mn + 2,583 \% Si + 14,017 \% Nb + 2,330 \% Cr$$

a qual apresentou coeficiente de correlação r igual a 0,78 e erro padrão da estimativa de 12 MPa.

É interessante notar que nesta equação quanto maior for o teor de C do aço, menor será expoente do termo exponencial, reduzindo o valor da resistência à deformação calculada, conforme já tinha sido constatado anteriormente na análise preliminar dos dados. O efeito dos elementos de liga incluídos no fator de correção diminuiu na seguinte ordem: Nb → Si → Cr → Mn. É basicamente o mesmo resultado já encontrado na análise preliminar dos dados, tendo havido apenas uma troca de posição entre os elementos Si e Cr. Contudo, o resultado proposto pela equação é o mais confiável, posto que seu ajuste foi feito a partir de todos os dados disponíveis, enquanto que a análise preliminar foi feita a partir de subconjuntos, para se realçar o efeito de um elemento de liga em particular. Note-se ainda que o efeito do Cr deve incluir também alguma influência do Cu, uma vez que na base de dados usada neste trabalho todo aço ao Cr também continha Cu.

- CONCLUSÕES

Mais uma vez foi constatado que as correlações entre a resistência à deformação a quente de aços produzidos industrialmente e os respectivos teores de elementos de liga podem ser mascaradas pelas tendências inerentes às composições químicas dos aços de uso comercial. Uma vez que os dados usados nesse trabalho foram obtidos a partir da laminação industrial a situação se torna ainda pior, uma vez que as condições de conformação deixam de ser impostas de maneira independente, como ocorre nos ensaios de laboratório.

Esta condição peculiar da massa de dados requer uma análise mais cuidadosa. Foi verificado que sua subdivisão criteriosa, concentrando-se a análise de uma só variável e mantendo-se as demais variando da forma mais restrita possível, permite que se determine com maior clareza seu efeito individual na resistência à deformação a quente. Por outro lado, essa abordagem requer uma grande quantidade de dados para ser viável, particularmente no caso de elementos de liga pouco usados.

Os resultados desta análise apontaram que os principais elementos de liga que afetam a resistência a quente dos aços são o C, Mn, Si, Cr e Nb. O Nb parece ter papel mais intenso, seguindo-se o Si, Cr e Mn. Note-se que neste trabalho em especial o papel do Cr se confunde com o do Cu, pois todos os aços ao Cr aqui estudados também continham Cu. O C foi o único elemento de liga que abaixou o valor da resistência à deformação a quente.

- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. GORNI, A.A. & CAVALCANTI, C.G. In: 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. LVI Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. Anais. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Belo Horizonte, Julho de 2001.
3. MEDINA, S.F. & HERNANDEZ, C.A. Acta Materialia, vol. 44, n. 1, 1996, p. 137-148.
4. MACCAGNO, T.M. ISIJ International, November 1994, 917-922.
5. COLLINSON, D.C. e outros. In: Mathematical Modelling of Steel Rolling. Proceedings. The Materials Society, London, 1993, 283-95.
6. SICILIANO JR., F. e outros. ISIJ International, December 1996, 1500-1506.
7. TAMURA, I. e outros. Thermomechanical Processing of High Strength Low-Alloy Steels. Butterworths, London, 1988. 248 p.

EFFECT OF ALLOY ELEMENTS IN THE HOT STRENGTH OF LOW CARBON STEELS¹

Antonio Augusto Gorni²
Pedro Segundo da Silva Vallin³

ABSTRACT

Several research projects developed by COSIPA to characterize the hot strength of its steels and to establish correlations with their chemical compositions were performed using laboratorial hot torsion tests. The conclusions got at that time were not enough reliable for industrial application, due to the few steel grades studied and to the unavoidable correlations between their amount of alloy elements. It was then decided to develop a similar work using hot strength values calculated from log data got at the hot strip mill. This approach generated much more data than that available from laboratorial tests, although some additional scattering in the hot forming parameters was unavoidable. The analysis of criteriously extracted subsets of data from the results got in that way, use of stepwise multiple correlation and fitting of Misaka equation to this data revealed that the most influencing alloy elements regarding hot strength are C, Nb, Si, Cr and Mn, in a decreasing rank. It was also verified that only C has a decreasing effect on hot strength. Increasing values of strain degree led to declining values of hot strength, a fact that indicated the occurrence of dynamic recrystallization during rolling at the F1 stand of the hot strip mill.

Keywords: Hot Strength, Alloy Elements, Mathematical Model

¹ Paper to be presented in the 59^o Annual ABM Congress, Brazilian Metallurgy and Materials Association, São Paulo, Brazil, July 19 to 22, 2004.

² Materials Engineer, M. Eng., Dr. Eng., Process Analyst of the Hot Rolling Technical Support Department, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP.

³ Mechanical Engineer, Process Analyst of the Hot Rolling Technical Support Department, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP.