

EFEITO DO CARBONO NA RESISTÊNCIA À DEFORMAÇÃO DOS AÇOS PROCESSADOS NO LAMINADOR DE TIRAS A QUENTE¹

Antonio Augusto Gorni²
João Vlasic Bajtalo³

Resumo

O processamento de aços com maior teor de carbono no Laminador de Tiras a Quente é mais difícil em função das maiores cargas de laminação observadas. Mas a literatura registra que esse elemento possui efeito amaciador sob altas temperaturas e baixas velocidades de deformação. Neste trabalho foram levantados os valores de resistência à deformação ao longo do Trem Acabador para aços com teores de carbono entre 0,01 e 0,45%. Foi constatado que esse elemento exerce efeito amaciador nas cadeiras F1 e F2, mas a situação se inverteu de forma progressiva para as demais. Portanto, se por um lado ficou confirmada a maior dificuldade em se laminar aços com maiores teores de carbono, por outro é possível aliviar essa situação aplicando-se maior fração da deformação total nas cadeiras F1 e F2.

Palavras-chave: Resistência à deformação a quente; Laminação de tiras a quente; Carbono.

THE EFFECT OF CARBON ON HOT STRENGTH OF STEELS PROCESSED AT THE HOT STRIP MILL

Abstract

The processing of steels with higher carbon contents is more difficult at the Hot Strip Mill due to the higher rolling loads that arise in this case. On the other hand, literature reports that this element has a softening effect under high temperatures and low strain rates. In this work the hot strength of steels with carbon content from 0.01 to 0.45% was determined for each stand at the Finishing Mill. It was verified that carbon has a softening effect in the F1 and F2 stands; however, this effect progressively reversed from F3 to F6. So, by one hand, it was confirmed that hot rolling higher carbon steels is harder, but it is possible to ease this situation increasing the total strain share of the F1 and F2 stands.

Key words: Hot strength; Hot strip rolling; Carbon.

¹ Contribuição técnica ao 46º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 27 a 30 de outubro de 2009, Santos, SP.

² Membro da ABM. Engenheiro de Materiais, M. Eng., Dr. Eng., Analista de Processos da Gerência de Suporte Técnico da Laminação a Quente, USIMINAS-Cubatão, Cubatão SP. E-Mail: Antonio.Gorni@usiminas.com.

³ Membro da ABM. Engenheiro Metalurgista, Analista de Processos da Gerência de Suporte Técnico da Laminação a Quente, USIMINAS-Cubatão, Cubatão SP. E-Mail: Joao.Bajtalo@usiminas.com.

1 INTRODUÇÃO

Os elementos de liga, além de contribuírem decisivamente para que os aços apresentem as propriedades desejadas por seus usuários, afetam significativamente suas outras características – por exemplo, a resistência à deformação a quente.

Este é o caso de um dos elementos de liga mais importantes do aço, o carbono. A relevância de seu efeito sobre a resistência à deformação a quente pode ser entendida quando se leva em conta que ele é o único elemento de liga que sempre está presente nas equações para cálculo desse parâmetro que levam em conta a composição química do aço. Este é o caso das equações de Misaka⁽¹⁾ e Shida,⁽²⁾ amplamente usadas nos meios industriais e acadêmicos. Os valores determinados por essas duas equações sinalizam que esse elemento sempre aumenta a resistência à deformação a quente dos aços.

Os resultados industriais geralmente obtidos aparentemente confirmam essa tendência, mas é necessário considerar que, sob condições práticas, aços com maiores teores de carbono também apresentam teores mais elevados de outros elementos de liga, fato que mascara os efeitos de endurecimento individuais.⁽³⁾ Por outro lado, uma análise dos resultados de resistência à deformação a quente determinados por ensaios laboratoriais com ligas contendo teores selecionados de carbono e demais elementos de liga, e considerando faixas mais amplas de temperatura, deformação e grau de deformação, mostrou evidências que nem sempre esse elemento possui efeito endurecedor. Um antigo trabalho de Wray já indicava, há quase trinta anos atrás, que um aumento no teor de carbono reduz a taxa de encruamento do aço deformado a quente, provavelmente por acelerar mecanismos de recuperação dinâmica em função do aumento da auto-difusão do ferro.⁽⁴⁾ Mais recentemente, Kong e outros⁽⁵⁾ constataram que teores mais elevados de carbono tendem a reduzir a resistência à deformação a quente do aço sob condições de alta temperatura e baixa velocidade de deformação, ocorrendo efeito contrário sob condições reversas. Este efeito pode ser expresso através do parâmetro Z de Zener-Hollomon: maiores teores de carbono promovem amaciamento do aço sob baixos valores de Z e endurecimento sob altos valores de Z.

Uma primeira evidência do efeito amaciador do carbono sob condições industriais foi observada a partir da análise da resistência à deformação calculada a partir de parâmetros industriais relativos à laminação de tiras a quente, onde se teve o cuidado de restringir as faixas de teores dos demais elementos de liga.⁽⁶⁾ Contudo, naquela oportunidade a análise ficou restrita à primeira cadeira do Trem Acabador (F1), cujas condições operacionais tendem a favorecer o efeito amaciador do carbono – ou seja, altas temperaturas e baixas velocidades de deformação.

O objetivo deste trabalho foi estender a análise feita nesse trabalho preliminar para todas as cadeiras do Trem Acabador do Laminador de Tiras a Quente da Usina de Cubatão da USIMINAS, de modo a mapear efetivamente o efeito do carbono sobre a resistência à deformação dos aços considerando-se todas as condições de processo reinantes ao longo desse equipamento.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Disponha-se de uma base de dados com 39.411 registros de bobinas processadas no Laminador de Tiras a Quente para as análises a serem feitas deste trabalho. Desse universo apenas 574 bobinas apresentavam teor máximo de carbono, correspondendo todas elas à norma SAE 1045. A composição química especificada

por esta norma serviu de critério para seleção das bobinas a serem analisadas para este trabalho, de forma a se manter os teores de elementos de liga tão constantes quanto possível, exceto obviamente no caso do carbono.

Dessa forma, o teor de manganês das bobinas a quente escolhidas ficou restrito entre 0,65% e 0,90%, enquanto que o de silício ficou inferior a 0,30%. Os teores dos demais elementos de liga deveriam ser desprezíveis; por este motivo, esses teores foram inferiores a 0,09% no caso do cobre, cromo e níquel, e a 0,009% no caso do nióbio, titânio, vanádio e boro. A temperatura de acabamento das bobinas escolhidas também foi superior ou igual a 910°C, garantindo-se assim que os materiais incluídos na análise foram totalmente laminados no campo austenítico.

As bobinas selecionadas conforme o critério descrito no parágrafo anterior foram então subdivididas em classes conforme seu teor de carbono, as quais foram definidas conforme as seguintes faixas de valores: 0,00%~0,10%; 0,10%~0,20%; 0,20%~0,30%, 0,30%-0,40% e 0,40%~0,50%. O número máximo de bobinas em cada classe de teor de carbono não poderia ser muito diferente de 574, que é o número de bobinas da classe com teor máximo de carbono. Dessa forma procurou-se evitar que o efeito das classes preponderantes se impusesse ao resultado global da análise. No caso das classes onde o número de bobinas foi maior do que 574 os registros excedentes foram eliminados de forma aleatória. Foi obtida dessa forma uma massa de dados com um total de 1.209 registros.

Foram coletados para cada bobina selecionada os respectivos dados de composição química, além de espessura de entrada e saída, largura, temperatura, velocidade de deformação e carga de laminação relativas 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.⁽⁷⁾

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

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Infelizmente, em função das características específicas do *mix* de produtos da usina, apenas duas classes de teor de carbono apresentaram número de bobinas significativo para a análise dentro dos 1.209 registros de dados de laminação coletados: entre 0,10% C e 0,20% C (616 bobinas) e entre 0,40% C e 0,50% C (574 bobinas). Portanto, a análise acerca do efeito do teor de carbono sobre a resistência à deformação a quente foi feita considerando-se apenas essas duas classes de material, que felizmente possuíam teores significativamente diferentes desse elemento. As 19 bobinas restantes enquadraram-se nas demais classes de teor de carbono e não foram incluídas na análise a seguir.

A Tabela 1 mostra a composição química média dos aços pertencentes às duas classes de teor de carbono aqui analisadas. Como se pode observar, apenas o teor de carbono foi significativamente diferente entre as duas classes estudadas; os teores dos demais elementos de liga significativos (manganês e silício) foram bastante próximos entre si.

Tabela 1. Composição química média das bobinas a quente pertencentes às classes de teor carbono efetivamente consideradas na análise

Classe	C	Mn	Si	n
0,10 < C ≤ 0,20	0,15	0,80	0,20	616
0,40 < C ≤ 0,50	0,47	0,72	0,20	574

Já a Tabela 2 mostra os valores médios dos parâmetros do processo de laminação a quente e a resistência à deformação calculada relativos a todas as cadeiras do Trem Acabador do Laminador de Tiras a Quente para as duas classes de carbono disponíveis. Note-se que os parâmetros médios de processo (temperatura, grau e velocidade de deformação) foram bastante similares entre as duas classes de teor de carbono para todas as cadeiras de laminação. Mas a situação da resistência à deformação a quente foi diferente conforme a cadeira de laminação considerada. No caso da F1 constatou-se que esse parâmetro foi 20% menor no caso das bobinas a quente com maior teor de carbono. A mesma tendência foi verificada para a cadeira F2, embora a diferença tenha sido de apenas 2%. A partir da cadeira F3 a resistência à deformação a quente elevou-se progressivamente no caso das bobinas a quente com maior teor de carbono; a diferença em relação às bobinas com menor teor de carbono elevou-se de 7% na F3 para 18% na F6. Ou seja, conforme já havia sido previsto na literatura⁽⁵⁾ e comprovado parcialmente na prática industrial,⁽⁶⁾ o efeito do carbono na resistência à deformação a quente alterou-se ao longo do Trem Acabador do Laminador de Tiras a Quente, reduzindo esse parâmetro para as primeiras cadeiras e aumentando-o para as últimas. Conforme mostra a Tabela 3, a contribuição do teor de carbono para a resistência à deformação a quente passou de -32 MPa/%C no caso da F1 para +125 MPa/%C no caso da F6.

A próxima etapa foi o desenvolvimento de uma equação para o cálculo da resistência à deformação a quente em função do teor de carbono e dos parâmetros de processo da laminação de tiras a quente – ou seja, temperatura, grau e velocidade de deformação. O comportamento contraditório do carbono sobre a resistência à deformação a quente, mostrado na Tabela 3, requer a inclusão de um parâmetro que permita sinalizar se o efeito desse elemento será positivo ou negativo. As indicações da literatura⁽⁵⁾ sugerem que o parâmetro de Zener-Hollomon pode atender a esse objetivo.

A massa de dados usada para a determinação dos dados mostrados nas Tabelas 1 a 3 não é adequada para o desenvolvimento dessa equação, uma vez que só aços de duas classes específicas de teor de carbono puderam ser consideradas. Em função disso, foi necessário definir um critério mais flexível para seleção de casos para que um maior número de registros pudesse ser incorporado à massa de dados. Foi então proposto um novo critério, basicamente similar ao anterior, mas com a diferença de que agora aços com qualquer teor de manganês ou silício fossem incluídos na massa de dados para análise. Isso obrigou à inclusão dos teores desses elementos de liga no modelo para cálculo de resistência à deformação a quente que foi desenvolvido.

Tabela 2. Valores médios dos parâmetros de processo e da resistência à deformação a quente calculada para as seis cadeiras do Trem Acabador do Laminador de Tiras a Quente para aços com duas faixas extremas de teor de carbono

Cadeira	Parâmetro	Classes		Δ	$\Delta\%$
		$0,10 < C \leq 0,20$	$0,40 < C \leq 0,50$		
F1	T [°C]	980	981	1	≈0
	Def	0,52	0,55	0,03	6
	VelDef [s ⁻¹]	12,2	12,4	0,2	2
	ResDef [MPa]	142	132	-10	-20
F2	T [°C]	963	963	0	0
	Def	0,38	0,38	0	0
	VelDef [s ⁻¹]	19,4	19,0	-0,4	-2
	ResDef [MPa]	166	163	-3	-2
F3	T [°C]	945	945	0	0
	Def	0,34	0,33	-0,01	-3
	VelDef [s ⁻¹]	31,4	29,8	-1,6	-5
	ResDef [MPa]	184	196	12	7
F4	T [°C]	928	929	1	≈ 0
	Def	0,27	0,27	0	0
	VelDef [s ⁻¹]	43,7	41,3	-2,4	-5
	ResDef [MPa]	230	245	15	7
F5	T [°C]	910	914	4	≈ 0
	Def	0,21	0,21	0	0
	VelDef [s ⁻¹]	60,0	52,6	-7,4	-12
	ResDef [MPa]	265	292	27	10
F6	T [°C]	895	897	2	≈ 0
	Def	0,13	0,13	0	0
	VelDef [s ⁻¹]	45,8	45,2	-0,6	-1
	ResDef [MPa]	234	276	42	18

Tabela 3: Contribuição específica para a resistência à deformação a quente promovida pelo carbono

Cadeira	F1	F2	F3	F4	F5	F6
[MPa/%C]	-32	-7	+35	+46	+78	+125

A massa de dados gerada por esse novo critério de seleção incluiu aços em todas as faixas de carbono que haviam sido definidas no Procedimento Experimental, exceto na classe de teores desse elemento entre 0,30% e 0,40%, onde só foram detectados oito casos. Mais uma vez a classe entre 0,40% e 0,50% de carbono apresentou número mínimo de elementos, 574. Por essa razão, o número de elementos das demais classes de teor de carbono foi limitado em torno desse valor, através de seleção aleatória dos dados, para evitar que a supremacia de algumas classes pudesse se sobrepor no ajuste da equação. Dessa forma obteve-se uma massa de dados com um total de 2.304 registros.

Foram testados vários tipos de fórmulas para o cálculo da resistência à deformação a quente σ em função dos parâmetros propostos. Chegou-se então à seguinte equação otimizada, tanto do ponto de vista do ajuste aos dados experimentais, como em relação à coerência com os mecanismos metalúrgicos constatados na literatura:

$$\sigma = \left[a + \left(b + \frac{c}{Z} \right) C + d Mn + e Si \right] e^{\frac{f}{T}} \epsilon^{g+hC} \dot{\epsilon}^i \quad (1)$$

Esta é uma equação consagrada para o cálculo da resistência à deformação a quente, expressando o efeito dos elementos de liga na forma de um fator multiplicativo, o da temperatura T através de uma função exponencial, e o do grau ϵ e da velocidade de deformação $\dot{\epsilon}$ através de funções de potência. Note-se que o expoente correspondente ao grau de deformação é função do teor de carbono, condição que levou a um melhor ajuste do modelo aos dados experimentais e que está coerente com as informações da literatura sobre o efeito do carbono no encruamento do aço durante a deformação a quente.⁽⁴⁾

Note-se que o parâmetro de Zener-Hollomon (Z) foi incluído no cálculo do fator que determina a influência do carbono, permitindo que ele se torne positivo ou negativo, em função das indicações da literatura.⁽⁵⁾ O parâmetro Z é calculado pela seguinte fórmula:

$$Z = \dot{\epsilon} e^{\frac{Q}{RT}} \quad (2)$$

O valor de Q , a energia de ativação para deformação a quente, pode ser calculado a partir da composição química do aço, conforme a fórmula abaixo, baseada na proposta por Medina e Hernández:⁽⁸⁾

$$Q [kJ/mol] = 267000 - 2536 C + 1010 Mn + 33620 Si \quad (3)$$

A equação aqui deduzida para cálculo da resistência à deformação a quente apresentou coeficiente de correlação múltipla r igual a 0,900 e erro padrão da estimativa de 25 MPa, configurando precisão razoável para dados ajustados a partir de condições industriais. Os valores obtidos para os coeficientes b e c da equação (1) permitiram concluir que o carbono apresenta efeito amaciador para valores de Z inferiores a $5,653 \times 10^{12}$, o que corresponde a uma condição intermediária às cadeiras F1 e F2, cujos valores médios de Z foram iguais a, respectivamente, $3,142 \times 10^{12}$ e $7,251 \times 10^{12}$. Logo, de acordo com esta equação, o carbono exerce efeito amaciador apenas para a F1; seu efeito nominal no caso da F2 deve ser no sentido de aumentar muito levemente a resistência à deformação a quente.

Os resultados obtidos em ambas as análises mostram que, de fato, o processamento de materiais na Laminação de Tiras a Quente torna-se globalmente mais difícil à medida que se aumenta o teor de carbono do aço devido ao aumento nas solicitações mecânicas que ocorrem a partir da cadeira F3. Por outro lado, o amaciamento que se verifica neste caso na F1 – e, eventualmente, na F2 – permite que maior fração da deformação total possa ser aplicada nessas cadeiras, aliviando as solicitações impostas às demais. Obviamente, outros fatores devem ser considerados ao se efetuar essa alteração no esquema de passes, como eventuais problemas de mordida na F1 e a ocorrência de ponta alta ou baixa nas demais.

4 CONCLUSÕES

Os resultados deste trabalho permitiram confirmar industrialmente as evidências obtidas na literatura sobre o efeito de redução na resistência à deformação a quente promovido pela elevação do teor de carbono dos aços para valores relativamente baixos do coeficiente Z de Zener-Hollomon – ou seja, altas temperaturas e baixas velocidades de deformação. Constatou-se assim que, para condições idênticas de processo de Laminação de Tiras a Quente, aços com maior teor de C tendem

a apresentar menor resistência à deformação a quente na cadeira F1 do Trem Acabador, valor praticamente similar na F2 e valores progressivamente maiores para as demais cadeiras.

Em outras palavras, aços com maior teor de carbono apresentam condições mais severas de processamento em função das maiores cargas de laminação impostas às últimas cadeiras do Trem Acabador. Contudo, é possível aliviar um pouco essa situação, aproveitando-se o efeito amaciador que esse elemento promove sob as condições típicas de processamento das primeiras cadeiras, aumentando de forma correspondente as reduções de espessura nelas aplicadas, desde que isso não implique em outros problemas operacionais, como problemas de mordida ou ocorrência de ponta alta ou baixa.

REFERÊNCIAS

- 1 MISAKA, Y. & YOSHIMOTO, T. Formularization of Mean Resistance to Deformation of Plain Carbon Steels at Elevated Temperature. **Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity**, v. 8, n. 79, p. 414-422, 1967-8 (em japonês).
- 2 SHIDA, S. Empirical Formula of Flow Stress of C Steels - Resistance to Deformation of C Steels at Elevated Temperature. **Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity**, v. 10, n. 103, p. 610-617, 1969.
- 3 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, 1997.
- 4 WRAY, P.J. Effect of Carbon Content on the Plastic Flow of Plain Carbon Steels at Elevated Temperatures. **Metallurgical Transactions A**, v. 13A, n.1, p. 125-134, January 1982.
- 5 KONG, L.X. e outros. Modelling the Effect of Carbon on Hot Strength of Steels Using a Modified Artificial Neural Network. **ISIJ International**, v. 38, n. 10, p. 1121-1129, Oct. 1998.
- 6 GORNI, A.A. & VALLIM, P.S.S. Efeito da Composição Química na Resistência à Deformação a Quente de Aços de Baixo Carbono Processados em Laminador de Tiras a Quente. In: 59º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – Internacional. **Anais...** São Paulo, 2004, 145-154.
- 7 MACCAGNO, T.M. e outros. Determination of T_{nr} from Rolling Mill Logs - Comparison with Laboratory Data. **ISIJ International**, v. 34, n. 11, p. 917-922, November 1994.
- 8 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, p. 137-148, 1996.