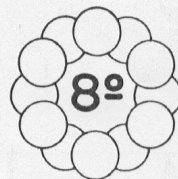


UNICAMP

EFEITO DO NÍOBIO NA RESISTÊNCIA À DEFORMAÇÃO DE AÇOS COM MÉDIO E ALTO TEOR DE CARBONO LAMINADOS A QUENTE

PAULO ROBERTO MEI  
Departamento de Engenharia de Materiais - UNICAMP  
SERGIO N. DOI  
COSIPA  
ALCEU FERRAZ COSTA NETO  
Departamento de Engenharia Mecânica-UNESP (Ilha Solteira)  
HANS J. KESTENBACH, OSCAR BALANCIN  
Departamento de Engenharia de Materiais - UFSCar



cbecimat

SUMÁRIO

Foram analisados os efeitos da adição de 0,3% Nb na tensão de escoamento na laminação de aços com 1% Mn e 0,2; 0,4 e 0,8% C, laminados entre 875 e 1250°C com redução de 17 a 20%. Observou-se que para uma determinada temperatura de laminação a variação do carbono entre 0,2 e 0,9% não provocava mudanças significativas na tensão de escoamento. A adição de nióbio elevou em até 15% a tensão de escoamento dos aços somente durante a laminação em temperaturas mais baixas (875 a 900°C).

1- INTRODUÇÃO

A microadição de nióbio em aços carbono provoca atrasos na recristalização e decomposição da austenita e precipitação de carbonitretos de nióbio. Estas modificações estruturais provocam alterações nas propriedades mecânicas, como por exemplo a tensão necessária para de formar o aço (denominada tensão de escoamento, tensão de deformação, tensão de escoamento restrita ou resistência à deformação). Do ponto de vista industrial o conhecimento destes efeitos é importante, pois facilita o dimensionamento dos equipamentos para conformação dos aços. Em relação aos aços de médio e alto teor de carbono (0,2 a 0,8% C) as informações existentes na literatura são esparsas e incompletas, o que levou à realização deste trabalho.

2- CÁLCULO NA LAMINAÇÃO A QUENTE

2.1) Coeficiente de atrito na laminação a quente

Para laminação sem lubrificação com cilindros de aço, são propostos os seguintes coeficientes de atrito:

1) EKELUND

$$\mu = 0,8(1,05 - 0,0005T) \quad T \text{ em } ^\circ\text{C} \quad (1)$$

2) GOLUBEV

Tabela 1. Coeficientes de atrito proposto por GOLUBEV [2]

TEMP °C	Faixas de velocidade periférica (m/s)				
	0,2	0,3 a 0,5	0,5 a 1,0	1,0 a 1,5	1,5 a 2,5
800	0,53-0,66	0,44-0,49	0,34-0,39	0,29-0,33	0,17-0,20
900	0,50-0,57	0,38-0,46	0,32-0,37	0,24-0,32	0,17-0,24
1.000	0,45-0,54	0,37-0,44	0,28-0,34	0,25-0,29	0,17-0,23
1.100	0,41-0,49	0,33-0,38	0,26-0,34	0,26-0,29	0,18-0,23
1.200	0,40-0,43	0,32-0,38	0,30-0,34	0,22-0,27	0,18-0,21

A velocidade periférica do cilindro ( $V_p$ ) é dada por [3]:

$$V_p = (rpm) \times \frac{2\pi R}{60} \quad (2)$$

2.2) Esforços na laminação a quente

Existem vários métodos para se calcular a força na laminação a quente (P) que utilizam a mesma equação básica [1]:

$$P = b \cdot \sqrt{R \Delta h} \cdot \sigma_{LAM} \cdot Q \quad (3)$$

onde  $\sigma_{LAM}$  = tensão de escoamento na laminação

R = raio do cilindro do laminador

b = largura da chapa =  $\frac{b_i + b_f}{2}$

$b_i$ ,  $b_f$  = largura antes e após o passe

$h_i$ ,  $h_f$  = espessura antes e após o passe

$\Delta h = h_i - h_f$

O valor de Q pode ser calculado por equações de diversos pesquisadores:

EKELUND [1]

$$Q_E = 1 + \frac{1,6 \mu \cdot \sqrt{R \Delta h} - 1,2 \Delta h}{h_i + h_f} \quad (4)$$

SIMS [1]

O valor de  $Q_s$  pode ser obtido na tabela 2

Tabela 2. Valores de  $Q_s$  em função da redução e da taxa R [1]

$\frac{R}{h_f}$	Valores de $Q_s$ em função da redução (r)				
	5%	10%	20%	30%	40%
2	0,857	0,880	0,905	0,912	0,904
5	0,904	0,948	1,003	1,037	1,055
10	0,956	1,022	1,111	1,173	1,216
20	1,029	1,127	1,264	1,362	1,439
30	1,086	1,208	1,379	1,505	1,608
50	1,175	1,337	1,563	1,734	1,875

OROWAN-PASCOE [1]

$$Q_p = \frac{1}{4} \left[ \pi + \sqrt{\frac{R \Delta h}{h_f^2}} \right] \quad (5)$$

3- DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Os aços empregados neste trabalho foram preparados em forno de indução a vácuo, em lingotes de 5kg cuja composição encontra-se na tabela 3

Tabela 3. Composição química dos aços

Aço	% em peso			ppm	
	C	Mn	Nb	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
2	0,18	1,00	---	35	40
2N	0,18	1,02	0,026	25	40
4	0,40	1,01	---	20	32
4N	0,41	1,02	0,031	17	40
8	0,79	1,03	---	20	30
8N	0,79	1,01	0,026	15	38

Os mesmos foram homogeneizados a 1250°C por 9 horas, e em seguida forjados entre 1070 e 900°C (temperaturas de início e final de forjamento) para barras quadradas de 30 mm. Essas barras foram utilizadas para os ensaios de laminação, a partir de amostras de igual geometria. O controle de temperatura foi realizado com termopares colocados nas amostras.

A laminação foi sem lubrificação com cilindro de 66,7 mm de raio, girando a 45 rpm. Para o 1º passe de laminação são os seguintes parâmetros do processo: h<sub>i</sub> = 16,4 mm, h<sub>f</sub> = 13,6 mm, b<sub>i</sub> = 34 mm e b<sub>f</sub> = 34,5 mm. Para o 2º passe os parâmetros foram: h<sub>i</sub> = 13,6 mm, h<sub>f</sub> = 10,8, b<sub>i</sub> = 34,5 mm e b<sub>f</sub> = 35 mm

4- RESULTADOS OBTIDOS

4.1) Esforços na laminação

Pela figura 1 observa-se que a força de laminação para uma mesma temperatura de laminação, não variou significativamente para os diferentes teores de carbono.

Este resultado está de acordo com os dados de TSELIKOV [4] que não observou diferenças significativas na tensão de laminação de aços com carbono variando de 0,15 a 0,55% na faixa de temperatura de 900 a 1200°C.

Na figura 2 nota-se que para altas temperaturas de laminação (1050 a 1250°C) praticamente não houve diferença na força de laminação para aços com e sem nióbio. Entretanto, a medida que a temperatura de laminação decresceu (875 a 900°C) os aços com nióbio necessitaram de um esforço maior do laminador. Isto certamente deriva de uma série de fatores:

- a) Endurecimento da austenita devido ao nióbio dissolvido e/ou na forma de precipitados Nb (C,N).
- b) A medida que a temperatura de austenitização diminui, acentuam-se as diferenças entre tamanho de grão austenítico nos aços com e sem nióbio (tabela 4).

4.2) Cálculo da tensão de escoamento na laminação

Para o 1º passe de laminação tem-se que:

$$V_p = \frac{(rpm) \times 2\pi R}{60} = \frac{45 \times 2\pi \times 66,7}{60} = 314 \text{ mm/s} = 0,31 \text{ m/s}$$

$$r = \frac{16,4 - 13,6}{16,4} = 0,17$$

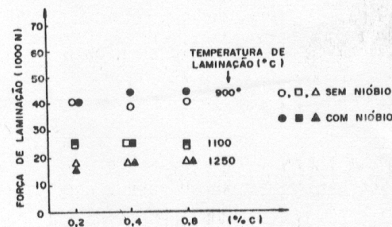


Figura 1. Esforços para a laminação de aços 0,2; 0,4 e 0,8 % C com e sem adição de nióbio, aquecidos em diferentes temperaturas para o 1º passe (redução de 17 %).

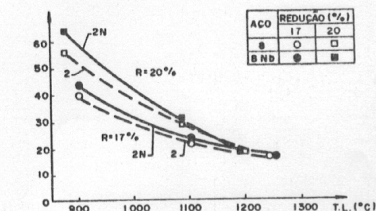
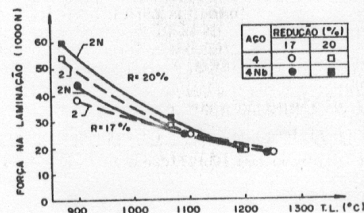
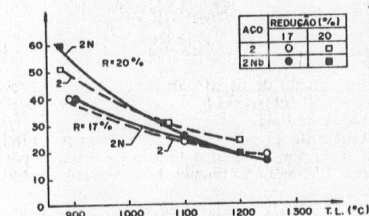


Figura 2. Força de laminação para os aços 0,2; 0,4 e 0,8 % C, com e sem adição de nióbio, laminados em diferentes temperaturas. As temperaturas de laminação do 1º passe foram a 900, 1100 e 1250°C. Para o 2º passe de 875, 1065 e 1200°C.

$$\frac{R}{r} = \frac{66,7}{13,6} = 4,9$$

Tabela 4. Razão entre os diâmetros de grãos austeníticos dos aços sem e com nióbio, após austenitização por 1 hora nas temperaturas indicadas.

Razão entre os diâmetros de grãos austeníticos dos aços	TEMPERATURA DE AUSTENITIZAÇÃO (°C)		
	900	1100	1250
2/2N	4,0	1,1	1,0
4/4N	4,6	1,7	1,0
8/8N	3,2	7,7	1,8

Os coeficientes de atrito encontram-se na tabela 5, e foram obtidos com os dados do item 2.1

Tabela 5. Coeficientes de atrito para a laminação a quente.

TEMPERATURA (°C)	EKELUND	GOLUBEV	MÉDIA
900	0,48	0,38	0,43
1100	0,40	0,33	0,37
1250	0,34	0,31*	0,32

\* estimado

Utilizando-se as médias dos coeficientes de atrito obtidos pela tabela 5, tem-se as constantes para a fórmula de EKELUND ( $Q_E$ ). Com outros parâmetros calcula-se os coeficientes de SIMS ( $Q_S$ ) e OROWAN-PASCOE ( $Q_P$ ), indicados na tabela 6.

Tabela 6. Coeficientes para o 1º passe de laminação.

T (°C)	$Q_E^*$	$Q_S^{**}$	$Q_P^{***}$	Q médio
900	1,201	0,986	1,037	1,07
1100	1,158	0,986	1,037	1,06
1250	1,121	0,986	1,037	1,05

\* Calculado pela fórmula (4), utilizando coeficientes de atrito da tabela 5

\*\* Extrapolado da tabela 2

\*\*\* Calculado pela fórmula (5)

Assim um valor médio para tensão de escoamento na laminação seria:

$$\sigma_{LAM} = \frac{P}{b \sqrt{R \Delta R} Q_m}$$

$$\sigma_{LAM} = \frac{P}{34,3 \sqrt{66,7 \cdot 2,8} \cdot 1,06} = \frac{P}{492} \text{ Kgf/mm}^2$$

$$\sigma_{LAM} = \frac{P}{50,2} \text{ N/mm}^2 \quad (6)$$

Como pela figura 2 observa-se que praticamente não há variação da força de laminação com o teor de carbono, pode-se tomar para a faixa de carbono utilizada (0,2 a 0,8 %) os seguintes valores de força de

laminação (tabela 7)

Tabela 7 - Força de laminação média para diferentes temperaturas no primeiro passe de laminação de aços com 0,2 a 0,8 % C, com e sem nióbio. Dados obtidos da figura 2.

T (°C)	P (N)
900	40.000
1100	25.000
1250	17.000

A partir da tabela 7 e da equação (6) chega-se a tensão de escoamento média na laminação dos aços utilizados (tabela 8).

Tabela 8. Tensão de escoamento média na laminação, calculada para os aços deste trabalho e comparada com a de outros autores.

T	TENSÃO DE ESCOAMENTO NA LAMINAÇÃO (MPa)				
	(°C)	obtida	TSELIKOV [4]	GELEJI [5]	DICELLO [6]
900		69	80	86	97
1100		43	46	52	58
1250		30	25	26	37

Obs: 1) GELEJI- $\sigma_{lam} = 0,173 (1400 - T(°C))$  MPa, válida para aços carbono com C < 0,6 %, Si < 0,5 % e Mn < 0,8 % laminados entre 800 e 1300°C

2) TSELIKOV - válida para aços carbono com 0,15 a 0,55 % C

3) DICELLO - válida para aços C=0,20% e Mn=1%

Observa-se que os valores encontrados situam-se próximo aos de outros autores, o que indica que a técnica de medição utilizada foi satisfatória.

Deve-se ressaltar que devido à diversidade de aços empregados e também de fórmulas para se calcular o coeficiente de atrito e a tensão de escoamento na laminação existe uma razoável dispersão entre os resultados obtidos pelos diversos pesquisadores. Em função disto os dados disponíveis na literatura servem apenas como um referencial para o valor da tensão de escoamento na laminação, não podendo ser encarados como absolutos.

O efeito do nióbio em aumentar a tensão de escoamento na laminação a medida que a temperatura da laminação diminui também foi observado por DICELLO [6]

#### 5- CONCLUSÕES

1- A tensão de escoamento na laminação para aços 0,2; 0,4 e 0,8 % C, 1% Mn, com e sem adição de 0,03% de nióbio aumentou a medida que a temperatura de laminação foi diminuída (na faixa de 900 a 1250°C). Entretanto, para uma dada temperatura de laminação a variação no teor de carbono entre 0,2 e 0,8 % praticamente não afetou a tensão de escoamento na laminação.

2- A adição de nióbio em aços com 1% Mn e 0,2 a 0,8 % C elevou em até 15 % a tensão de escoamento na laminação durante laminações em temperaturas na faixa de 875 a 900°C e reduções na faixa de 17 a 20 %. Para temperaturas maiores (1065 a 1250°C) e mesmas taxas de redução o nióbio praticamente não alterou a tensão de escoamento na laminação.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Eletrometal, Metais Espe-

ciais S.A., através de seu Presidente Dr. José Dinis de Sousa pela preparação dos aços utilizados neste trabalho, ao CNPq e à FAPESP por auxílios financeiros e bolsa recebidos.

## REFERÊNCIAS

- [1] LARKE, E. C. & COOK, M. - The rolling of ship, sheet and plate. Science Paperbacks, 1976, p. 343 a 367.
- [2] TSELIKOV, A. - Stress and strain in metal rolling. Mir Publishers, Moscow, 1967, p. 291.
- [3] PLAUT, R. L. - Laminação dos aços. Tópicos avançados. 2a. Edição, Associação Brasileira de Metais, S.P., 1986, p. 25.
- [4] WUSATOWSKI, Z. - Fundamentals of rolling, Pergamon Press, 1969, p. 230.
- [5] WUSATOWSKI, Z. - Fundamentals of rolling, Pergamon Press, 1969, p. 57.
- [6] DICELLO, J. A. & AICHEHAUMIK, D. - The resistance of HSLA steels to deformation during hot rolling - In: Thermomechanical processing of microalloyed austenite. De Ardo, A.J., Editor, The Metallurgical Society of AIME, 1981, p. 529.

## ABSTRACT

The effects of 0,03 % Nb addition on the resistance to deformation of 1 % Mn, 0,2 to 0,8 % C steels, rolled between 875 and 1250°C, with 17 to 20 % reduction, was analysed. It was observed that for a fixed rolling temperature the carbon content variation between 0,2 to 0,8 % didn't affect the resistance to deformation. The addition of 0,03 % Nb led to an increase up to 15 % the resistance to deformation during rolling between 875 and 900°C.