

DEFORMAÇÃO DE AÇOS INOXIDÁVEIS ABNT316 A TAXAS DE DEFORMAÇÃO SIMILARES ÀS ENCONTRADAS NA LAMINAÇÃO A QUENTE¹

José Aparecido de Almeida²
Ronaldo Barbosa³

RESUMO

Ensaio de torção a quente são freqüentemente usados na simulação de processos de laminação. Entretanto, eles apresentam limitações, dentre elas as baixas taxas de deformação usualmente empregadas.

Trabalho anterior descreveu técnica experimental que permite obter resultados de ensaios de torção a quente a taxas de deformação da ordem de $100s^{-1}$, sendo, essas compatíveis com às encontradas na laminação a quente. Este trabalho apresenta curvas de fluxo de aço ABNT316 obtidas com o uso da técnica de ensaio acima mencionada. Os resultados aqui relatados foram utilizados na avaliação de quais seriam as cargas de laminação nos casos das laminações de aços inoxidáveis em laminadores acabadores do tipo Steckel ou nos laminadores de tiras.

Palavras-Chaves: Aços inoxidáveis austeníticos, Ensaio de torção a quente, Laminação de tiras a quente.

-
1. 41º Seminário de Laminação Processos e Produtos Laminados e Revestidos. 26 a 28 de outubro de 2004 – Joinville – SC – Brasil
 2. Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, Mestre, TI Automotivo do Brasil Ltda.
 3. Membro da ABM, Engenheiro Mecânico, Mestre., Dr., Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG

1. INTRODUÇÃO

A laminação de planos produz chapas grossas e tiras. O processo de fabricação de chapas grossas é realizado em laminadores reversíveis com mesas à frente e à ré. As deformações são aplicadas em passes sucessivos de valores médios em torno de 0,3 e taxas de deformação variando entre 1 a 10s^{-1} do primeiro ao último passe. O processo de fabricação de tiras a quente, por outro lado, é realizado em duas fases, desbaste e acabamento, sendo que o desbaste é similar à laminação de chapas grossas enquanto a laminação de acabamento se dá em trens contínuos. O acabamento é realizado, portanto, sem reversões, com taxas de deformações da ordem de 10 a 100s^{-1} das cadeiras iniciais às finais. O acabamento dos aços 316 pode também ser realizado em laminador do tipo Steckel. Neste caso, o esboço é laminado até a espessura final da tira em passes reversíveis com bobinamento e desbobinamento das mesmas dentro de fornos a frente e a ré da cadeira de laminação. A laminação no Steckel se dá com tempos entre passes relativamente longos pela necessidade do bobinamento e do desbobinamento, como descrito. Entretanto, as taxas de deformação são também elevadas, sendo similares, em alguns passes, às encontradas na laminação num trem de tiras (1,2).

A laminação de não planos, barras e fios-máquina, apresentam várias características similares à de planos. A laminação de barras se parece com a laminação de chapas grossas, no que diz respeito às temperaturas, deformações, tempos entre passes e taxas de deformação. A laminação de fios-máquina, por outro lado, se assemelha à de tiras a quente, isto é, seu acabamento é realizado em trens contínuos onde as taxas de deformação começam com valores da ordem de 1s^{-1} terminando com valores maiores que 100s^{-1} (1,2).

Vários ensaios mecânicos, dentre eles o de torção a quente, são utilizados para simular aspectos dos processos de laminação. Os ensaios mecânicos, entretanto, apresentam algumas limitações, sendo uma delas a taxa máxima de deformação que eles conseguem reproduzir. As taxas de deformação usuais não ultrapassam 10s^{-1} chegando, raramente, a 50s^{-1} (3). Dessa forma, valores de carga calculados para os acabamentos de tiras ou de fios-máquina só podem ser realizados por meio de extrapolações de dados obtidos de ensaios mecânicos executados a taxas de deformação consideravelmente inferiores às observadas nas linhas industriais.

Trabalho anterior (4) apresentou técnica experimental em que os testes de torção são realizados a taxas de deformação de até 100s^{-1} , possibilitando uma avaliação de valores de cargas de laminação com dados mais próximos da realidade industrial. O presente trabalho aplica a técnica anteriormente desenvolvida e obtém dados sobre o comportamento de curvas tensão-deformação para os aços ABNT316.

2. METODOLOGIA

O material empregado nesta pesquisa foi um aço inoxidável austenítico tipo ABNT 316 com composição química 0,051C, 1,37Mn, 0,49Si, 0,038P, 0,005S, 16,94Cr, 11,32Ni e 1,87Mo, todos os números em percentagem do peso. Ensaios de torção a temperatura e taxa de deformação constante foram realizados em equipamento servo-hidráulico computadorizado. As temperaturas foram medidas empregando-se termopares tipo cromel-alumel revestidos com tubos de 1,5mm de diâmetro de aço inoxidável ABNT 316 com isolamento mineral. Dados de torque e deslocamento

angular foram coletados digitalmente durante os ensaios e armazenados em meio magnético para posterior processamento.

Os corpos de provas dos experimentos tinham comprimentos da parte útil diferenciados. Aqueles utilizados para curvas tensão-deformação, $\sigma \times \epsilon$, com taxas de deformação até $10s^{-1}$ (corpos de prova longos) tinham um comprimento da parte útil de aproximadamente 14,4mm e 6,37mm de diâmetro. Os corpos de prova usados para experimentos com taxas de deformação maiores, 50 e $100s^{-1}$ (corpo de prova curtos) tinham comprimento da parte útil de 1,8mm e o mesmo diâmetro dos corpos de prova longo.

O procedimento de ensaio consistiu em aquecer o corpo de prova à temperatura de 1473K (1200°C) por 900s (15min) e em seguida resfriá-lo até a temperatura de ensaio, à taxa de 1K/s (1°C/s). A amostra permaneceu, nessa temperatura, por 600s (10min) com o objetivo de se promover a sua homogeneização. Caso a temperatura do teste fosse 1473K (1200°C), esse procedimento de homogeneização era dispensado. Em seguida, os corpos de prova foram torcidos nas temperaturas de 1473, 1373, 1273 e 1173K (1200, 1100, 1000 e 900°C) a taxas de 0,1, 1, 10, 50 e $100s^{-1}$ sendo realizados 20 ensaios no total.

Sinais de torque (Volt) e de deformação (Volt), lidos durante cada ensaio de torção, foram convertidos em tensão-deformação conforme se relata na literatura (5).

3. RESULTADOS

Curvas tensão-deformação

As Figuras 1 e 2 mostram curvas tensão-deformação medidas para o aço 316. As curvas apresentam formatos similares não importando a temperatura de ensaio. Uma breve análise sobre esse formato é realizada a seguir, tomando-se como referência o conjunto de curvas de ensaios realizados a 1173K (900°C).

Pode-se notar que existe um pico de tensão para taxas de 0,1, 1 e de $10s^{-1}$. Este último muito suave, levando a um estado estacionário de tensões ligeiramente decrescente com a deformação. Os valores da tensão e da deformação de pico são 185MPa e 0,45 respectivamente, para a taxa de $0,1s^{-1}$. O pico de tensão nesse caso é bem definido pois a tensão de estado estacionário é de 160MPa. Já à taxa de $1s^{-1}$, a tensão de pico, a deformação de pico e a tensão de estado estacionário são respectivamente 230MPa, 0,5 e 200MPa. No caso de taxas de deformação de $10s^{-1}$, a tensão de pico, a deformação de pico e a tensão de estado estacionário são respectivamente 290MPa, 0,6 e 280MPa à deformação de 2,0. Nota-se que a diferença entre tensão de estado estacionário e de pico diminuiu com o acréscimo da taxa de deformação. Quando a taxa de deformação passa para $50s^{-1}$ o pico de tensão se mostra muito suave e, praticamente, não há diferença entre tensão de pico e de estado estacionário. A $100s^{-1}$ a curva passa a ser continuamente crescente. Recristalização dinâmica parece ocorrer a taxas de 0,1, 1 e $10s^{-1}$ mas esta é, de certo modo, suprimida a taxas superiores à temperatura de 900°C. Esse mesmo quadro se repetiu, de um modo geral, para as demais temperaturas.

Equação constitutiva para tensão e deformação de pico

A carga de laminação é uma função das variáveis geométricas do processo, do coeficiente de atrito e da tensão necessária para deformar o material. Existem várias equações que podem ser usadas para estimar o valor da carga de laminação, sendo a equação de Sims muito utilizada na laminação a quente de planos. Essa equação pode ser escrita como

$$P = \bar{s} w \sqrt{R(h_i - h_f)} Q_s \quad (1)$$

Os símbolos representam a tensão média no passe, \bar{s} , a largura da chapa, w , o raio do cilindro, R , as espessuras inicial e final, h_i e h_f , e, finalmente, um fator geométrico Q_s , crescente com a deformação e com a relação R/h_f . O valor da tensão média, \bar{s} , depende da temperatura, da deformação e da taxa de deformação. Logo, torna-se necessário estabelecer uma equação que descreva essa relação para se obter o valor da carga P . Faz-se, portanto, necessário obter uma equação “constitutiva” que descreva como a tensão depende da temperatura e da taxa de deformação e uma equação de “evolução” para descrever a dependência dessa mesma tensão com a deformação. A equação utilizada habitualmente para relacionar a tensão à temperatura e taxa de deformação é dada por (6)

$$Z = \exp\left(\frac{Q_{def}}{RT}\right) = A(\sinh(\alpha \sigma))^n \quad (2)$$

Aqui, Z é o parâmetro de Zener-Hollomon, Q_{def} é uma energia de ativação, R a constante dos gases, $8,31\text{J}/(\text{mol K})$ e A , n e α são constantes. A Figura 3 (a) mostra quão bem a expressão acima relaciona Z à tensão de pico, σ_p , observando-se, neste caso o coeficiente de correlação R^2 de 0,94.

4. DISCUSSÃO

Aplicação ao caso da laminação de tiras a quente

A laminação de tiras a quente é realizada, em geral, em laminadores dispostos em tandem com pequena distância entre cadeiras o que reduz o tempo entre passes a poucos segundos nos primeiros passes e a frações de segundo nos últimos passes. As deformações nos primeiros passes são elevadas, da ordem de 0,6, esse valor diminuindo nas últimas cadeiras para algo em torno de 0,3 a 0,2 para garantir espessura final e planicidade da tira. As taxas de deformação se iniciam na faixa de 1 a 10s^{-1} terminando, não raro, por volta de 100s^{-1} . Um exemplo típico de uma seqüência de laminação de tiras a quente é a que se mostra na Tabela 2 abaixo (7).

Tabela 2: Seqüência típica da laminação de tiras a quente no trem de laminação acabador. Os símbolos são a deformação no passe, ϵ , a taxa de deformação, $\dot{\epsilon}$ e o tempo entre passes, t_{ip} .

Passe	ϵ	$\dot{\epsilon}$, s ⁻¹	t_{ip} , s	T, °C
F1	0.68	8.9	4.09	956
F2	0.52	15.3	2.71	920
F3	0.52	29.2	1.79	916
F4	0.55	57.4	1.16	902
F5	0.36	77.4	0.87	894
F6	0.40	117.2	0.64	884
F7	0.26	131.7	--	871

A carga de laminação pode ser considerada proporcional à tensão média, conforme mostrado na Equação (1). O valor da tensão média pode ser estimado a partir do cálculo da tensão de pico re-arranjando a Equação (5)

$$\sigma_p = \frac{1}{\alpha} \left\{ \sinh^{-1} \left[\left(\frac{Z}{A} \right)^n \right] \right\} \quad (3)$$

A Figura 3 (b) mostra como as tensões de pico variam com a temperatura para a seqüência de passes mostrada na Tabela 1 acima. A Figura mostra também valores obtidos de modo similar para o caso de uma laminação hipotética de aços Livres de Intersticiais, aços LI, na mesma seqüência da Tabela 2. Esses dados foram apresentados para servir como uma referência.

Aplicação ao caso da laminação de tiras a quente no laminador do tipo Steckel

O laminador do tipo Steckel é muito diferente de um trem de laminação de acabamento de tiras. O Steckel possui 2 fornos posicionados um a frente e outro a ré sendo que a tira é laminada em passes sucessivos reversíveis. A tira é bobinada dentro desses fornos após deformação tanto num sentido de laminação quanto no outro. Como conseqüência, a queda na temperatura é lenta dependendo da temperatura dos fornos de bobinamento. O processo de laminação também é consideravelmente mais longo que o anterior fazendo com que as taxas de deformação sejam menores que as registradas na Tabela 2.

A Figura 3 (b) mostra uma comparação entre as tensões de pico que seriam obtidas numa laminação hipotética num laminador do tipo Steckel. Todos os dados utilizados para o laminador acabador de tiras foram utilizados para o cálculo das tensões de pico para o laminador Steckel, exceto os dados referentes às taxas de deformação. Neste caso, as taxas de deformação empregadas foram aquelas mostradas na Tabela 2 divididas, porém, por um fator de 10. Como pode ser visto, as tensões médias são consideravelmente mais baixas do que as esperadas para o trem de laminação acabador de tiras a quente.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho permite concluir o que se segue:

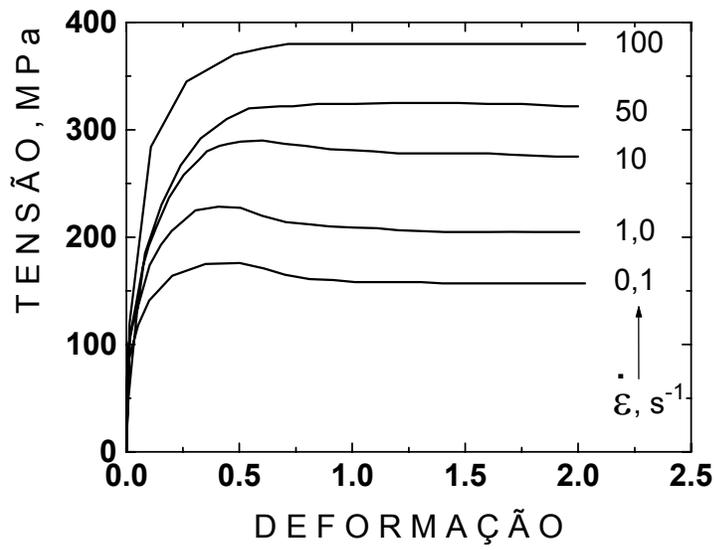
- 1- Curvas tensão-deformação aqui obtidas podem ser descritas por equações constitutivas simples estabelecendo relações claras entre as tensões para uma deformação particular com a temperatura e a taxa de deformação;
- 2- Essas equações constitutivas podem ser usadas para estimar variações nas cargas de laminação a quente quando são utilizados aços diferentes ou mesmo laminadores diferentes;
- 3- Cargas de laminação serão consideravelmente maiores no acabamento de tiras a quente processadas em trens de laminação do que em laminadores do tipo Steckel.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

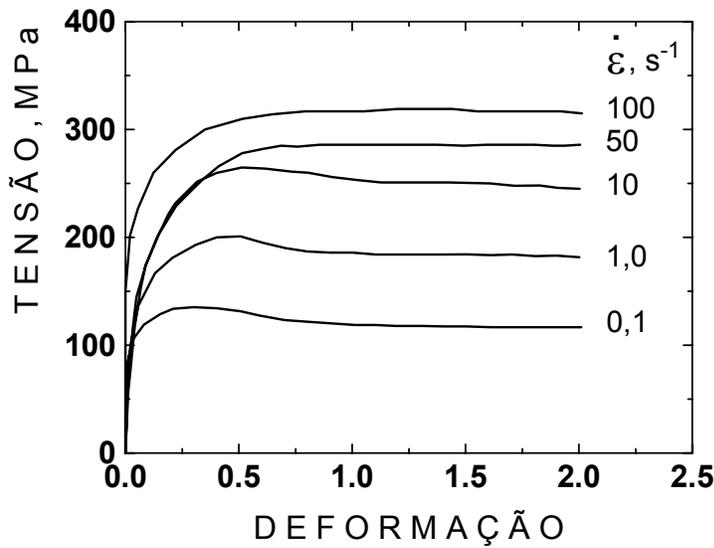
- 1- T.M. Maccagno, J.J. Jonas e P.D. Hodgson, Spreadsheet modelling of grain size evolution during rod rolling, **ISIJ International**, p. 720-728, 1996.
- 2- P. R. Cetlin, S. Yue e J.J. Jonas, Simulated rod rolling of Interstitial free steels, **ISIJ International**, p. 488-497, 1993.
- 3- H. J. McQueen e N.D. Ryan, Constitutive analysis in hot working, *Materials Science and Engineering A322*, p.43-63, 2002.
- 4- J. A. de Almeida e R. Barbosa, Deformação de aços inoxidáveis ABNT304 a taxas de deformação típicas de laminação de tiras a quente, In: 39º Seminário de Laminação Processos e Produtos Laminados e Revestidos. 23 a 25 de outubro de 2002 - Ouro Preto - MG – Brasil. Anais...Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo, SP, 2002. pp. 89-97.
- 5- D.S. Fields e W.A. Backofen, Determination of strain-hardening characteristics by torsion testing, *American Society for Testing and Materials*, 57 (1957), pp. 1259-1272.
- 6- H.J. McQueen and J.J. Jonas, Recovery and recrystallization during high temperature deformation, In: *Treatise on Materials Science and Technology*, vol. 6: Plastic Deformation of Materials, 1975. Academic Press, New York, pp. 394-493.
- 7- F. Siciliano Jr., K. Minami, T.M. Maccagno e J.J. Jonas, Mathematical modeling of the mean flow stress, fractional softening and grain size during the hot strip rolling of C-Mn steels, *ISIJ International*, 36, no.12 (1996), pp. 1500-1506.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico Tecnológico, pelo apoio financeiro a este trabalho.

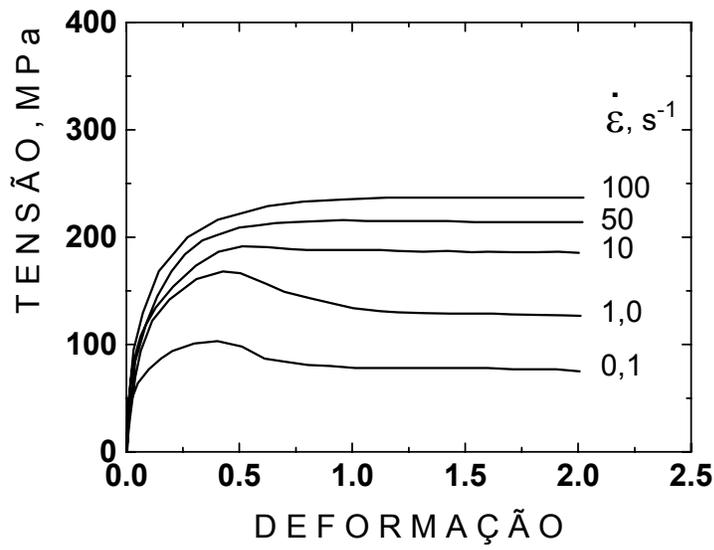


(a)

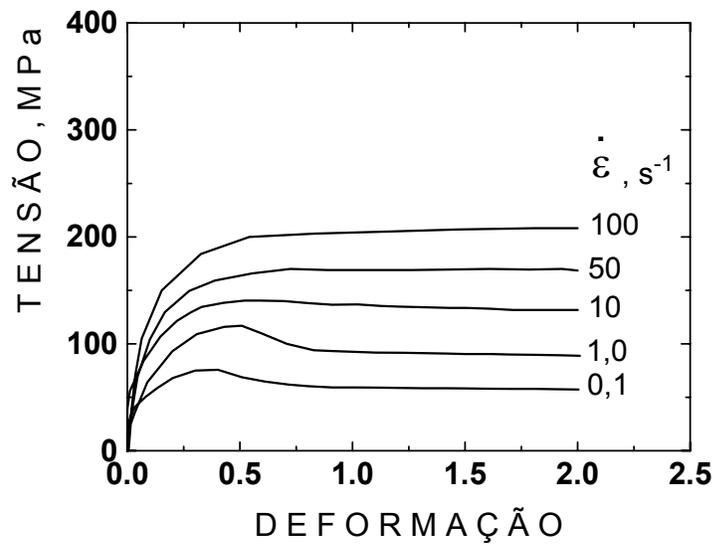


(b)

Figura 1- Curvas tensão-deformação obtidas via ensaio de torção a quente para aço inoxidável austenítico ABNT 316 testado a taxas de deformação nominais constantes de 0,1, 1, 10, 50 e 100s⁻¹ nas temperaturas de a) 1173K (900°C) e b) 1273K (1000°C).

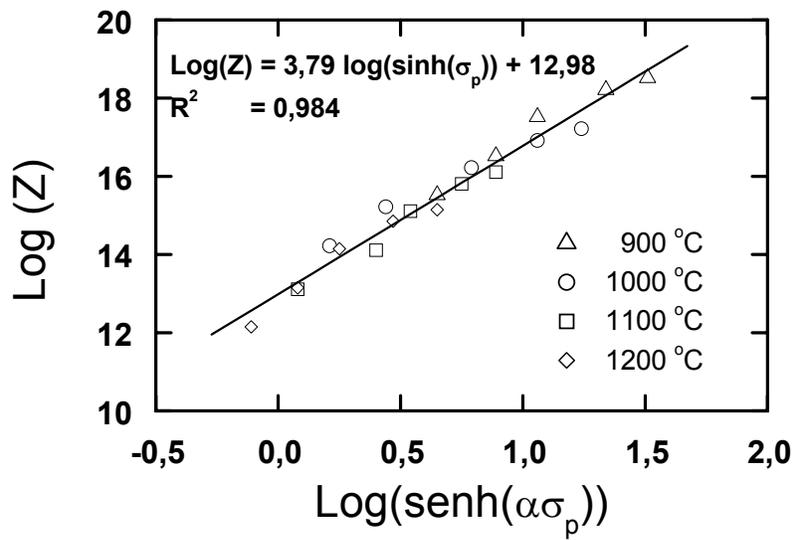


(a)

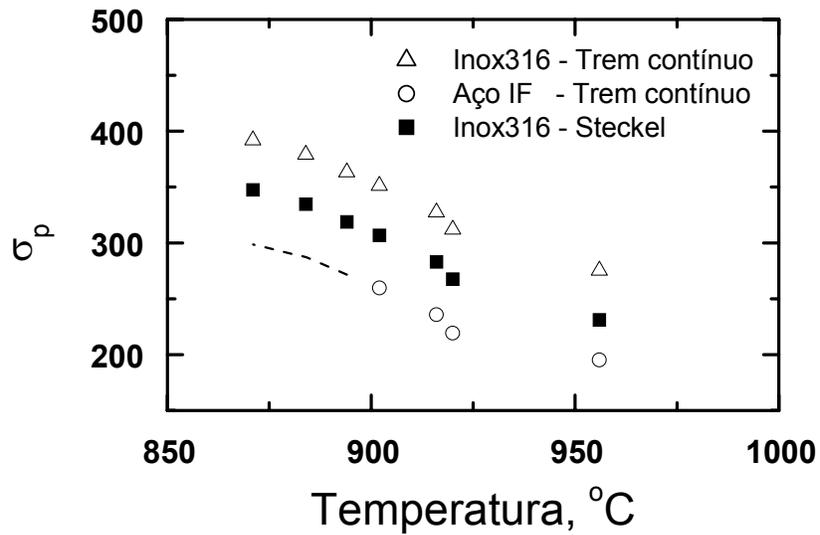


(b)

Figura 2- Curvas tensão-deformação obtidas via ensaio de torção a quente para aço inoxidável austenítico ABNT 316 testado a taxas de deformação nominais constantes de 0,1, 1, 10, 50 e 100s⁻¹ nas temperaturas de a) 1373K (1100°C) e b) 1473K (1200°C).



(a)



(b)

Figura 3- (a) Relação entre a tensão de pico e o parâmetro de Zener-Hollomon e (b) simulações de variações das tensões de pico como função na mudança do tipo de aço sendo laminado e do laminador sendo utilizado.

“HOT DEFORMATION OF AUSTENITIC STAINLESS TYPE 316 AT STRAIN RATES TYPICAL OF HOT STRIP ROLLING”

ABSTRACT

Hot torsion testing is often used in the simulation of hot rolling processes. The tests, however, present limitations, among them, the low strain rates usually attained.

Previous work described an experimental technique allowing high strain rates of the order of 100s^{-1} to be attained. Such rates are compatible with the ones found in the final passes of hot strip mills. This work presents stress-strain curves for steel ABNT316 obtained using the experimental technique mentioned above. The results here reported are used in an attempt to estimate changes in hot rolling loads in the cases of rolling austenitic stainless steels in Steckel type mills or in strip finishing tandem mills.

Key words: Austenitic stainless steels, Hot torsion tests, Hot rolling of strips.