

EQUAÇÕES CONSTITUTIVAS DE AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS ABNT316 PARA MODELAGEM DE PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO REALIZADOS A ELEVADAS TAXAS DE DEFORMAÇÃO¹

José Aparecido de Almeida²

Ronaldo Barbosa³

Resumo

Os ensaios de torção a quente são comumente empregados na simulação de processos de laminação embora esses apresentem limitações, dentre elas as baixas taxas de deformação utilizadas. Este trabalho apresenta técnica experimental que permite obter resultados de ensaios de torção a quente a taxas de deformação de até 100s^{-1} , sendo essas compatíveis às encontradas nos processos de conformação a quente industriais. A taxa de deformação em ensaios de torção a quente depende da velocidade de giro do pistão acionador e da relação r/L do corpo de prova. Quanto maior o raio, r , ou menor o comprimento útil L da amostra, maior será essa taxa. No presente trabalho, ensaios de torção a quente foram realizados em equipamento de teste movido hidráulicamente sendo que o pistão acionador pôde alcançar uma taxa de rotação de 1000 rpm. As amostras empregadas tinham uma relação r/L quase 15 vezes maior que a usualmente empregada nesses testes o que permitiu obter taxas elevadas de deformação, como pretendidas. Taxas de deformação da ordem de 100s^{-1} foram obtidas neste trabalho para amostras de aço inoxidável tipo ABNT 316 ensaiados em torção a quente. Os resultados foram comparados com os existentes na literatura e discutidos. Mostra-se claramente que os valores de tensão obtidos dos ensaios a taxas de deformação elevadas se ajustam adequadamente com aqueles outros obtidos de ensaios realizados a taxas de deformação relativamente baixas. Isto sugere que uma única equação constitutiva é suficiente na previsão de valores de tensões obtidas para uma gama ampla de taxas de deformação.

Palavras-chave: Aços inoxidáveis austeníticos; Ensaios de torção a quente; Processos de conformação a quente.

¹ 60º Congresso Anual da ABM. 25 a 28 de Julho de 2005 – Belo Horizonte – MG – Brasil

² Engenheiro Metalurgista, Mestre, TI Automotivo.

³ Membro da ABM, Engenheiro Mecânico, Mestre, Dr., Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG

1 INTRODUÇÃO

Vários são os processos industriais utilizados na conformação a quente. Dentre eles a laminação é talvez o mais importante. A laminação de planos pode ser dividida em pelo menos duas etapas: o desbaste e o acabamento. Na primeira, passes são aplicados com tempos entre eles relativamente longos e a temperaturas usualmente acima de 1000°C. Neste caso, há tempo suficiente para que o metal se recristalize entre passes, refinando o tamanho dos grãos em passes sucessivos. Recristalização estática e crescimento de grão são os fenômenos que preponderam nesta fase da laminação. Na etapa de acabamento, entretanto, os tempos entre deformações diminuem consideravelmente, as taxas de deformação crescem e as temperaturas nos passes são, não raro, abaixo de 900°C. Desse modo, é possível que deformação seja acumulada de passe a passe inexistindo um significativo amaciamento entre eles, levando eventualmente à ocorrência de recristalização dinâmica seguida de recristalização metadinâmica no processo de deformação (1).

Vários ensaios mecânicos, dentre eles o de torção a quente, podem ser utilizados na simulação de alguns aspectos da laminação. Dentre esses aspectos, talvez o mais importante, seja a capacidade de produzir, através de ensaios mecânicos pertinentes, curvas tensão-deformação que possam ser utilizadas no cálculo ou na avaliação da resistência mecânica do laminado durante seu processamento a quente. Neste caso, o ensaio de torção apresenta algumas vantagens em relação aos demais pelo o fato de o mesmo poder gerar curvas tensão-deformação para valores elevados de deformação, similares àquelas possivelmente acumuladas nos vários passes de deformação do processo de conformação a quente (2- 5).

Para que as resistências durante laminação possam ser avaliadas, faz-se então necessário realizar um conjunto de ensaios em que curvas tensão-deformação sejam medidas numa ampla faixa de taxas de deformação. O presente trabalho mostra como resultado, um conjunto de curvas oriundas de ensaios realizados a taxas que vão de 0,1 a 100s⁻¹ para um aço inoxidável austenítico. Os dados experimentais disponíveis na literatura são comparados com os resultados aqui obtidos, tanto no caso de deformação isotérmica quanto no caso de deformação em resfriamento contínuo, mais similar à situação da laminação a quente.

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 quente para obtenção de curvas tensão-deformação foram realizados a temperatura e taxa de deformação constante utilizando-se para isto um equipamento servo-hidráulico computadorizado. As temperaturas foram medidas empregando-se termopares tipo cromel-alumel revestido com tubos de 1,5mm de diâmetro de aço inoxidável ABNT 316 com isolamento mineral. Dados de torque e deslocamento angular foram coletados digitalmente. Sinais de torque (Volt) e de deformação (Volt), lidos durante cada ensaio de torção, foram convertidos em tensão-deformação e a tensão e a deformação equivalentes foram calculadas da maneira usual (6).

Corpos de provas dos experimentos foram usinados com dois tipos de geometria: a primeira, denominada de geometria de corpos de prova longos, foi utilizada para

ensaios em que as taxas de deformação não eram superiores a 10s^{-1} . Neste caso específico, a parte útil dos corpos de prova tinha, aproximadamente, 14,4mm de comprimento e 6,37mm de diâmetro. Já os corpos de prova usados para experimentos com taxas de deformação maiores, 50 e 100s^{-1} tinham comprimento da parte útil de 1,8mm e o mesmo diâmetro dos corpos de prova longo.

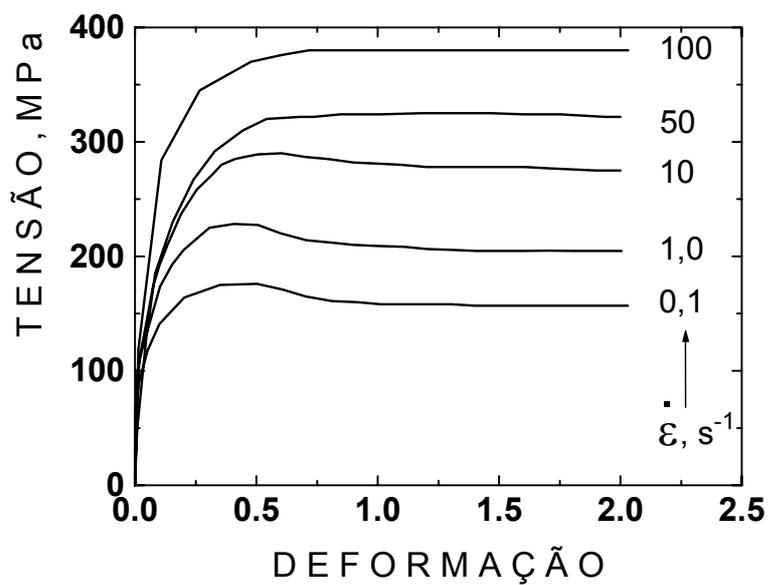
O procedimento de ensaio consistiu em aquecer o corpo de prova à temperatura de 1473K (1200°C) por 900s (15min) e em seguida resfriá-lo até a temperatura de ensaio, à taxa de 1K/s (1°C/s). A amostra permaneceu, nessa temperatura, por 600s (10min) com o objetivo de se promover a sua homogeneização. Caso 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.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

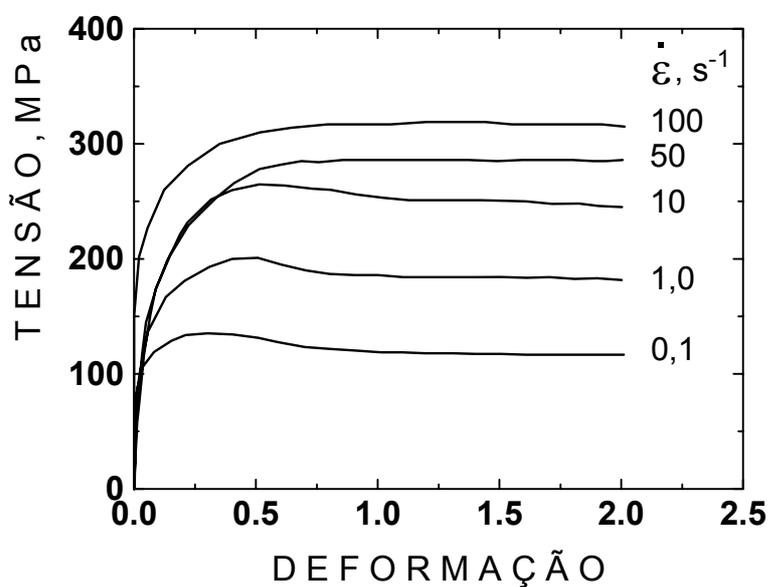
Curvas tensão-deformação

A Figura 1 mostra uma série de curvas do tipo tensão versus deformação obtidas de ensaios de torção a quente com o aço inoxidável tipo 316. Em todos os ensaios, as deformações totais aplicadas às amostras foram interrompidas em aproximadamente 2, valor de deformação equivalente. Isto ocorreu porque se pretende, neste artigo, concentrar a atenção nos processos de conformação a quente de acabamento, isto é, aqueles onde as deformações totais se encontram na faixa de 2 a 2,5, deformação equivalente. Além disso, percebe-se que, em todos os ensaios, tanto os de alta quanto os de baixa taxa de deformação, um estado estacionário de tensões foi atingido, isto é, o nível de tensões não mais variava com o acréscimo de deformação. Por isto, o ensaio poderia ser interrompido neste valor de deformação, sem perda de informação relevante à modelagem dos processos de conformação a quente. As curvas, por outro lado, apresentam formatos similares não importando a temperatura de ensaio. Inicialmente, como esperado, há um aumento da tensão com o acréscimo da deformação. A tensão atinge, entretanto, patamares de estado estacionário em deformações relativamente pequenas, em torno de 0,4 a 0,5. Isto significa que, caso ocorra acúmulo de deformações de passe a passe no acabamento, a tensão máxima seria rapidamente atingida. Por esta razão, embora seja claramente uma forte simplificação, não seria de todo irrealista utilizar o valor de tensão máxima na simulação de processos de conformação a quente desses aços, como será abaixo mais detalhado.

Outra característica importante das curvas mostradas na Figura 1 é que a maneira como o estado estacionário é atingido varia de acordo com a taxa de deformação. A taxas baixas, a tensão cresce até um valor máximo e depois decresce até um valor de estado estacionário. Já a taxas elevadas, a tensão cresce até atingir um valor de estado estacionário sem a presença de um valor máximo. No primeiro caso, ocorre recristalização durante deformação ou recristalização dinâmica. Já a taxas elevadas, este mecanismo deixa de ocorrer sendo substituído por recuperação dinâmica. Os processos de conformação a quente se iniciam com passes aplicados a taxas moderadas evoluindo rapidamente para taxas maiores, consistentes com as taxas superiores mostradas na Figura. Logo, depreende-se aqui que recristalização



(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).

dinâmica, se ocorrer, deveria ser o evento importante apenas nos primeiros passes de acabamento, logo sendo substituído por recuperação dinâmica. De qualquer modo, ocorrendo recristalização dinâmica ou apenas recuperação dinâmica, parece

ser importante prever o valor da tensão máxima como função da taxa e da temperatura de deformação. O que se fará aqui é supor que, independente da taxa de deformação, o valor da tensão máxima pode ser tomada como aproximadamente igual ao valor da tensão de estado estacionário. Dessa forma, a deformação no passe deixaria de ser uma variável importante, uma vez que, como se viu acima, a tensão de estado estacionário, por definição, não depende da deformação. Esta é uma suposição relativamente forte e suas conseqüências nas previsões de esforços de conformação a quente será discutida em maiores detalhes mais adiante.

Equação constitutiva para tensão máxima

As cargas de conformação podem ser calculadas por expressões do tipo

$$P = [f_1(\textit{tensão média})f_2(\textit{geometria})f_3(\textit{atrito})](\textit{Área de contacto}) \quad (1)$$

A carga de conformação depende, como se vê, do valor do coeficiente de atrito e da geometria de conformação, sendo que esta última ainda compreende a influência da deformação redundante sobre o esforço. Estas componentes são claramente importantes e não devem ser desprezadas. Este trabalho, entretanto focaliza sua atenção na tensão média e na sua dependência da taxa de deformação e da temperatura do passe, isto é, supõe ser razoável que a expressão abaixo seja válida:

$$P \approx f_1(\textit{tensão média})(\textit{Área de contacto}) \quad (2)$$

Assim, a carga de laminação, por exemplo, seria estimada aqui usando, simplesmente, uma equação como a que se segue:

$$P \approx \bar{s}w\sqrt{R\Delta h} \quad (3)$$

Todos os símbolos nesta equação têm seus significados habituais. Lembrando agora que

$$\bar{s} = \bar{y}/1,15 \quad (4)$$

então

$$P \approx (\bar{y}/1,15)w\sqrt{R\Delta h} \quad (5)$$

reduzindo-se a questão de se estimar cargas de conformação, neste trabalho, à de se obter a relação

$$\bar{y} = f_3(\&T) \quad (6)$$

Supondo ainda que

$$\bar{y} \approx \sigma_{\textit{máxima}} = \sigma_p \quad (7)$$

segue-se que estimativas de esforços de conformação poderiam ser realizados caso fosse conhecida a relação entre a tensão máxima e as variáveis taxa de deformação e temperatura do passe. Ou, em outras palavras, se fosse possível relacionar essas tensões a uma variável que combinasse taxa de deformação e temperatura do passe. Isto, em geral, é realizado utilizando-se a expressão ou equação “constitutiva” (1)

$$Z = \exp\left(\frac{Q_{def}}{RT}\right) = A(\sinh(\alpha \sigma))^n \quad (8)$$

Aqui, Z é o parâmetro de Zener-Hollomon, Q_{def} é uma energia de ativação, R a constante dos gases, 8,31J/(mol K) e A, n e α são constantes. Apesar da aparência complexa, esta equação pode ser empregada com bastante simplicidade, sendo muito útil, como se verá, nas estimativas de esforços de conformação. A Figura 2 mostra, ademais, quão bem a expressão acima relaciona Z à tensão de pico, σ_p , observando-se, nestes ajustes um coeficiente de correlação R^2 de 0,94 para a curva da Figura 2.

Validação dos resultados experimentais

A Figura 3 apresenta uma comparação entre os dados obtidos nesta pesquisa com outros relatados na literatura. Conforme se vê, há uma concordância razoável entre os dois conjuntos de dados, validando, dessa forma, os resultados advindos dos experimentos desta pesquisa.

As tensões máximas podem ser calculadas conforme se mostra na Equação (8). Assim, as tensões médias podem ser estimadas conforme se vê na Equação (7). Este procedimento é útil e as tensões calculadas podem ser comparadas àquelas medidas diretamente de um laminador. Neste caso, os passes são dados a temperaturas declinantes, isto é, um primeiro passe poderia ser aplicado a 1000°C e um segundo a 980°C, por exemplo, e assim sucessivamente. Dados de cargas de laminação, entretanto, são raramente relatados na literatura o que dificulta uma validação dos resultados experimentais aqui obtidos com os aqueles de uma linha industrial. Dados, porém de ensaios de torção a quente com temperaturas declinantes podem, por outro lado, permitir uma comparação entre tensões calculadas, usando a Equação (8), e as tensões medidas do ensaio de torção, podendo assim validar o procedimento adotado neste trabalho. A Figura 4 mostra essa comparação salientando-se que os valores previstos foram calculados como uma fração aproximada de 80% do valor da tensão máxima. Pode-se observar que há uma concordância surpreendentemente boa entre os valores previstos e os calculados, exceto talvez no caso do ponto a 900°C. Neste caso, o valor medido é ligeiramente maior que o calculado levando-se a acreditar que houve entre o penúltimo e o último passe algum acúmulo de deformações, elevando-se, dessa forma o nível da tensão.

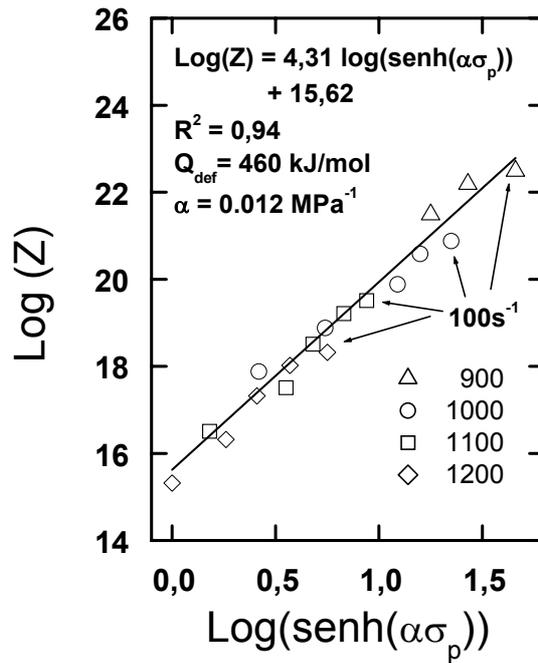


Figura 2. Relação entre o parâmetro de Zener-Hollomon e a tensão de pico para o aço inoxidável tipo ABNT316. Pontos de ensaios realizados a taxas elevadas, 50 e 100s⁻¹, se misturam com os de taxas menores.

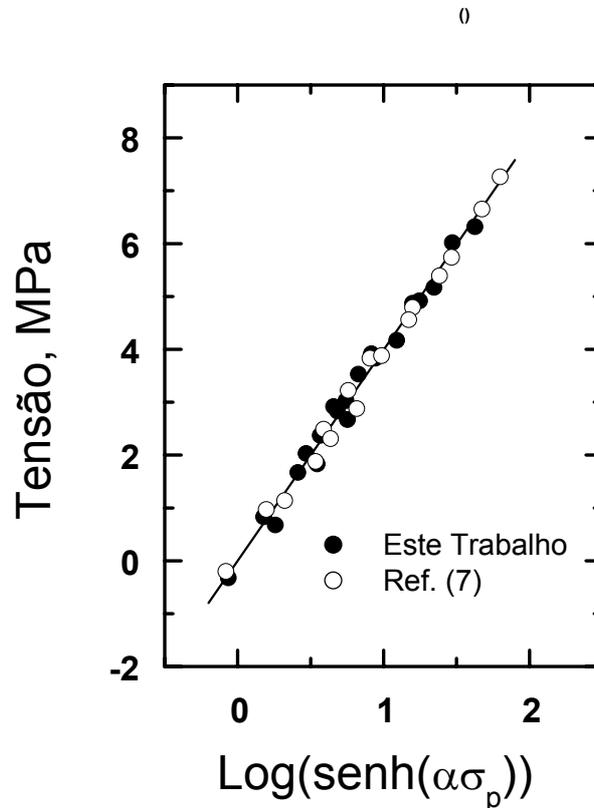


Figura 3. Comparação entre a tensão de pico obtida em experimentos realizados neste trabalho com dados relatados na literatura, no caso de ensaios isotérmicos.

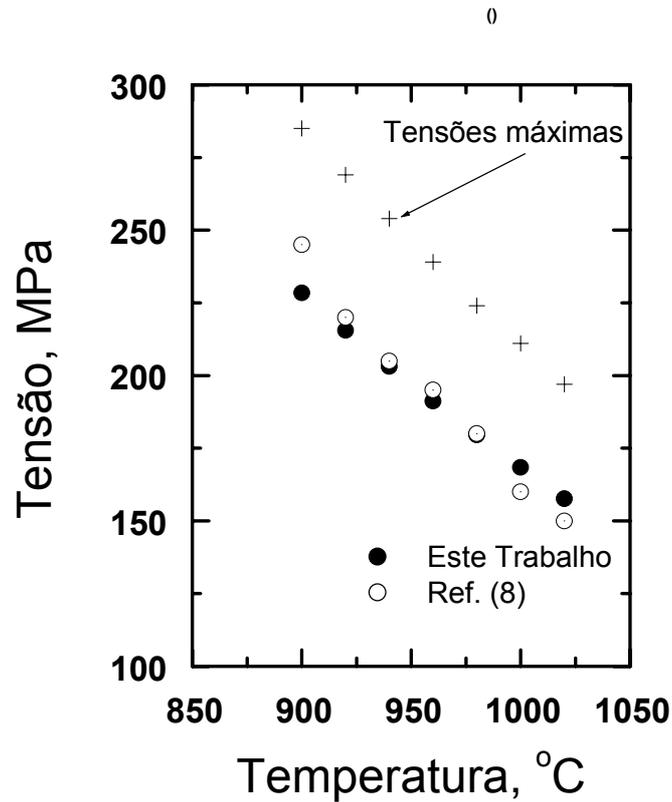


Figura 4. Dependência da tensão média da temperatura de passe executados com amostra em resfriamento contínuo. Círculos representam tensões calculadas a partir da tensão máxima, representada por diamantes enquanto os quadrados são pontos experimentais relatados na literatura (8) para taxa de deformação $1s^{-1}$ e deformações equivalentes de 0,2 por passe.

4 CONCLUSÕES

O presente trabalho permite concluir o que se segue:

- 1- Curvas tensão-deformação obtidas para aços inoxidáveis austeníticos do tipo ABNT316 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 tensões médias no processo de laminação a quente quando são utilizadas diferentes condições de temperaturas e de taxas de deformação no processo de conformação, conforme ilustrado na Figura (4).

Agradecimentos

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

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 JONAS, J. J.; McQUEEN, H. J. Recovery and recrystallization during high temperature deformation. In: TREATISE ON MATERIALS SCIENCE AND TECHNOLOGY, 6., 1975. **Plastic Deformation of Materials...** New York: Academic Press, 1975. p. 394-493.
- 2 McQueen, H.J., Elevated-temperature deformation at forming rates of 10^{-2} to 10^2s^{-1} . **Metallurgical and Materials Transactions A**, p. 345-362, 2002.
- 3 McQueen, H.J. and Ryan, N.D., Constitutive analysis in hot working, *Materials Science and Engineering A322* , p.43-63, 2002.
- 4 Maccagno, T.M., Jonas, J.J. e Hodgson, P.D., Spreadsheet modelling of grain size evolution during rod rolling, **ISIJ International**, p. 720-728, 1996.
- 5 Cetlin, P.R., Yue, S. and Jonas, J.J., Simulated rod rolling of Interstitial free steels, **ISIJ International**, p. 488-497, 1993.
- 6 BACKOFEN, W. A.; FIELDS, D. S. Determination of strain-hardening characteristics by torsion testing. **American Society for Testing and Materials**, 57, p. 1259-1272.
- 7 TEODOSIU, C., NICOLAE, V., SÒOS, E. e RADU, G.G. **Rev. Roum. Sci. Tech., Méc. Appl.**, v24, no. 1, p 13, 1979
- 8 McQUEEN, H.J. e RYAN, D. Constitutive analysis in hot working, **Materials Science and Engineering A**, 322, p. 43-63, 2002

CONSTITUTIVE EQUATIONS FOR AUSTENITIC STAINLESS STEELS ABNT 316 TO MODEL FORMING PROCESSES CONDUCTED AT HIGH STRAIN RATES¹

*José Aparecido de Almeida²
Ronaldo Barbosa³*

Abstract

Hot torsion testing is commonly used in the simulation of hot rolling although the technique presents some import limitations, among them the low strain rates at which tests are usually conducted. This work presents a simple laboratory testing technique able to produce data for stress-strain curves to strain rates as high as $100s^{-1}$, hence compatible with those found in the industry. The rate of straining during torsion testing depends on the rate of twisting of the actuator and on the ratio r/L of the sample. The higher this ratio, that is, the larger the sample radius or the smaller its length, the larger will be the rate at which the sample will be deformed for a given RPM at the actuator. The present paper reports experiments with r/L ratios 15 times higher than the usually employed in hot torsion. This, together with the ability of rotating the sample at 1000RPM produced the strain rates needed to obtain stress-strain curves at rates similar to those present at hot rolling of several industry products. It is here also shown that the values of stresses so obtained are in agreement with results reported for lower ranges of strain rates, suggesting that a single constitutive equation is capable of predicting values of stresses for a wide range of strain rates.

Key-words: Austenitic stainless steels; Hot torsion tests; Hot forming processes.

¹ *60° Annual Conference of the Brazilian Metallurgical and Materials Association. July, 25- 28, 2005 – Belo Horizonte – MG – Brazil*

² *Metallurgical Engineer, Master Degree on Metallurgy, Process Development Corporation do Brasil.*

³ *Member of the Brazilian Metallurgical and Materials Association, Mechanical Engineer, Master Degree on Metallurgical Engineering, Dr., Associate Professor the Department of Metallurgical and Materials Engineering, Federal University of Minas Gerais.*