

SIMULAÇÃO DOS PRIMEIROS PASSES DA LAMINAÇÃO A QUENTE DE ACABAMENTO DE UM AÇO IF USANDO ENSAIOS DE COMPRESSÃO E DE TORÇÃO¹

Kleiner Marques Marra²
Túlio Magno Füzessy de Melo³
Antônio Adel do Santos⁴

Resumo

Foram comparadas as curvas de fluxo obtidas em ensaios de torção e de compressão cilíndrica, referentes aos dois primeiros passes da laminação a quente de acabamento de um aço IF microligado ao titânio, sendo reproduzidas as condições industriais de deformação. Para isto foi empregado um simulador termomecânico Gleeble modelo 3500. O intuito foi verificar se o comportamento do aço IF era semelhante nos dois ensaios. Foi observado que o ensaio de torção exibiu um nível mais baixo de tensão de fluxo e que o formato das curvas foi diferente nos dois ensaios. Isto certamente está ligado à existência de atrito entre as matrizes da máquina Gleeble e os corpos-de-prova (Cps) no ensaio de compressão e ao melhor controle térmico e da taxa de deformação na torção. A partir das tensões médias de fluxo obtidas em cada passe nos ensaios mecânicos foi possível calcular valores estimativos de carga de laminação. A comparação entre as cargas calculadas e as cargas reais de laminação (cargas obtidas na laminação industrial do aço IF amostrado para estudo) mostrou que o ensaio de compressão prevê maiores valores e o ensaio de torção estima menores valores. Ressalta-se, no entanto, que os valores calculados a partir dos dados de torção mostraram, comparativamente à compressão, menor desvio em relação às cargas industriais.

Palavras-chave: Aço IF; Ensaio de torção; Ensaio de compressão cilíndrica; Laminação a quente.

SIMULATION OF THE FIRST FINISHING PASSES OF THE HOT ROLLING OF AN IF STEEL USING TORSION AND COMPRESSION TESTS

Abstract

The flow curves obtained by torsion and cylindrical compression tests have been compared. These curves were based on the two first passes of the industrial hot finishing rolling of a titanium-IF steel. A 3500 Gleeble machine was used for the tests. It was observed that the torsion test showed a lower flow resistance and the format of the curves was different between the two tests. The friction between matrices/samples in the compression test, the better temperature and strain rate control in the torsion samples could explain the results.

The compression test gave higher values and torsion test showed lower and more close values of calculated rolling loads when compared to actual ones.

Key words: IF steel; Torsion test; Compression test; Hot rolling.

¹ *Contribuição Técnica ao 43º Seminário de Laminação - Processos e Produtos Laminados e Revestidos, Curitiba, PR, 17 a 20 de outubro de 2006.*

² *Membro da ABM; Engenheiro Metalurgista, Dr., Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas; Ipatinga, MG.*

³ *Membro da ABM; Engenheiro Mecânico, Dr.-Ing, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas; Ipatinga, MG.*

⁴ *Membro da ABM; Engenheiro Metalurgista, MSc., Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas; Ipatinga, MG.*

1 INTRODUÇÃO

O estado de tensão/deformação gerado sobre as tiras metálicas durante a laminação a quente é bastante complexo. A despeito disto, freqüentemente se lança mão de ensaios mecânicos relativamente simples, como os ensaios de compressão e de torção, para avaliar a plasticidade de metais ou para prever o comportamento dos materiais em laminação.

Segundo Wong e colaboradores,⁽¹⁾ a deformação de aços em ensaios mecânicos a altas temperaturas deve ser encarada com restrições uma vez que nestas condições existem, inevitavelmente, gradientes térmicos/mecânicos nos corpos-de-prova (Cps) que podem mascarar grandemente os resultados.

No ensaio de compressão uniaxial simétrica, também chamado de compressão cilíndrica por usar corpos-de-prova cilíndricos, a fricção entre material e matrizes da máquina de ensaio pode causar grandes distúrbios nos resultados, com o abaulamento dos Cps, e, conseqüentemente, o estabelecimento de um complicado estado de tensões/deformações. Para não ocorrer isto, a máxima quantidade de redução que se deve efetuar nesse ensaio é de 50%, para alguns autores,⁽²⁾ e de 80% para outros.⁽¹⁾ De qualquer forma, isto é um grande problema pois esses valores são freqüentemente suplantados nas operações de laminação.

Já o ensaio de torção, mesmo não normalizado, vem sendo crescentemente empregado nos últimos anos. O grande atrativo deste ensaio é poder aplicar elevadas quantidades de deformações já que não há fricção entre matrizes e Cps, além de ser possível o emprego de elevadas taxas de deformação, compatíveis com os valores máximos empregados na laminação de acabamento de aços (valores da ordem a 100 s^{-1}). A taxa de deformação é variada pela velocidade de rotação do eixo do equipamento de ensaio, onde são fixados os Cps. Já a quantidade de deformação é imposta através do ângulo de giro aplicado aos corpos-de-prova.

Whittaker e colaboradores⁽³⁾ acharam diferenças apreciáveis entre as curvas de fluxo de aços carbono manganês e aços ligados ao Ni ou ao Si, obtidas com ensaios de torção e de compressão, principalmente para o caso de dois passes sucessivos. Segundo esses autores, no ensaio de torção, durante a aplicação do 2º passe, pelo formato da curva, parece ter havido quase total restauração dos aços, o que não ficou evidenciado na compressão. A observação metalográfica de corpos-de-prova temperados mostrou que em ambos os ensaios a microestrutura apresentava-se bem deformada. No entanto, na torção foi observada uma maior heterogeneidade no escoamento do material. Nesse ensaio, o fluxo plástico ocorre primeiramente na superfície dos Cps, onde a magnitude da tensão é maior, para depois propagar-se para seu interior,⁽⁴⁾ sendo nulo na região central. Desta maneira, na periferia dos corpos-de-prova de torção havia indícios de recristalização.

Por outro lado, Rao e colaboradores,⁽⁵⁾ trabalhando com um aço C-Mn, constataram que a forma das curvas de fluxo para compressão e torção são semelhantes até uma quantidade de deformação verdadeira de 0,4. Além desse valor, as curvas evidenciaram o fenômeno da recristalização dinâmica na torção, o que não ocorreu no ensaio de compressão até deformações de 0,8. Essa diferença de comportamento foi creditada, pelos pesquisadores, às diferenças quanto à fricção e ao próprio modo de deformação de cada ensaio.

Portanto, de acordo com o que foi exposto, os resultados obtidos pelos dois testes mecânicos não são totalmente concordantes. Em razão disto, neste trabalho, foram comparados os dois primeiros passes da laminação a quente de acabamento de um aço IF, reproduzidos por torção e compressão cilíndrica. Com isto procurou-

se verificar, para este material, se há também diferenças entre as curvas de fluxo dos dois ensaios.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foram realizados ensaios mecânicos a quente de torção e de compressão cilíndrica numa máquina Gleeble, modelo 3500.

Para isto tomou-se um aço IF, com teor de carbono de 30ppm, microligado ao titânio (700ppm). Este material foi amostrado após laminação de desbaste, na entrada do trem acabador da Usiminas, sendo a amostra obtida pelo seccionamento e rápido resfriamento (em água) da ponta inicial do esboço.

Nos ensaios mecânicos foram reproduzidos somente os dois primeiros passes da laminação de acabamento do aço, uma vez que no ensaio de compressão não deve ser atingido um valor acumulado de redução de 80%, que equivale à deformação verdadeira de 1,6. Isto, como já dito, decorre de haver, acima deste patamar, grande heterogeneidade na deformação, com destacado abaulamento dos Cps. A Tabela 1 mostra as condições industriais de deformação para os dois primeiros passes da laminação do aço IF (deformação acumulada de 1,1).

Com relação aos Cps usados nos ensaios mecânicos, a Figura 1 fornece as dimensões dos mesmos. Nota-se que o volume útil do corpo-de-prova de compressão é bem maior que do Cp de torção. Já a Tabela 2 fornece as equações utilizadas para o cálculo da deformação verdadeira, taxa de deformação e tensão de fluxo nos dois ensaios, de acordo com informações de literatura^(1,2,3), sendo considerado o critério de von Mises. O ciclo termomecânico aplicado ao aço IF, nos dois ensaios, está mostrado na Figura 2.

Tabela 1. Condições de deformação a quente dos dois primeiros passes da laminação a quente de acabamento do aço IF.

1° Passe	Temperatura (°C)	996
	Deformação verdadeira	0,6
	Taxa de deformação (s ⁻¹)	13
Tempo entre passes (s)		5
2° Passe	Temperatura (°C)	979
	Deformação verdadeira	0,5
	Taxa de deformação (s ⁻¹)	25

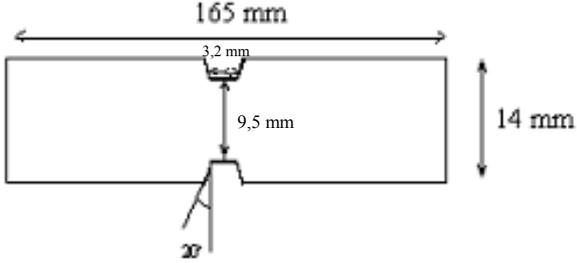
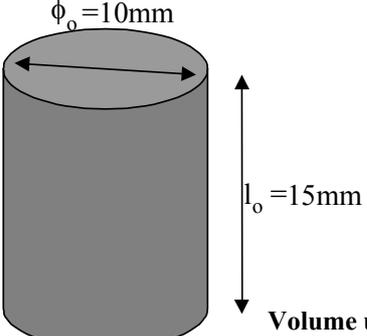
 <p style="text-align: center;">Volume útil = 226,8mm³</p>	
Croquis do Cp de torção	Fotografia do Cp de torção
 <p style="text-align: center;">Volume útil = 1178,18mm³</p>	
Croquis do Cp de compressão	Fotografia do Cp de compressão

Figura 1. Detalhes dos corpos-de-prova de compressão e de torção.

Tabela 2. Equações para cálculo da deformação verdadeira (ϵ), da taxa de deformação ($\dot{\epsilon}$) e da tensão de fluxo (σ) nos ensaios de compressão e de torção.

Ensaio de Compressão	Ensaio de Torção
$\sigma = \frac{F_i}{\left[\frac{\pi \cdot (d_o)^2 \cdot l_o}{4 \cdot l_i} \right]}$ $\epsilon = \ln \frac{l_i}{l_o}$ $\dot{\epsilon} = \frac{\epsilon}{t}$	$\sigma = \frac{3,3\sqrt{3}}{2 \cdot \pi r^3} M$ $\epsilon = \frac{2\pi}{\sqrt{3}} \cdot \frac{r}{l_o} \cdot \theta_{rev}$ $\dot{\epsilon} = \frac{\epsilon}{t}$
<p>F_i = força instantânea agindo sobre os punções, d_o = diâmetro inicial do Cp, l_o = comprimento inicial do Cp, l_i = comprimento instantâneo do Cp.</p>	<p>M = Torque, r = raio do Cp, l_o = comprimento útil do Cp, θ_{rev} = ângulo de giro (em número de revoluções), t = tempo de deformação.</p>

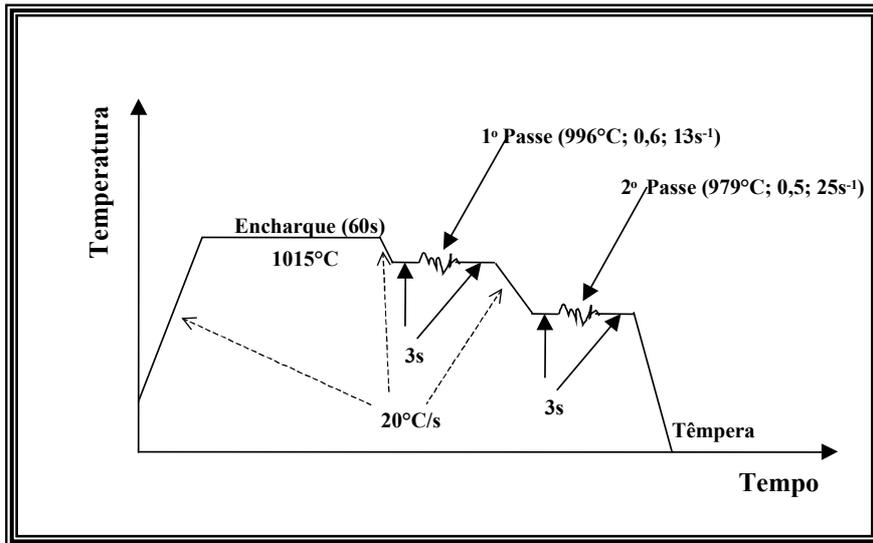


Figura 2. Ciclo termomecânico aplicado aos Cps do aço IF na compressão e na torção.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 mostra as curvas de fluxo obtidas. Nota-se que a resistência à deformação no ensaio de compressão foi maior que na torção. Isto foi também observado em outros estudos,^(5,7) sendo relacionado à presença de atrito entre Cp e matrizes da máquina de ensaio, próprio da compressão, e ao melhor controle da taxa de deformação e menores diferenças de temperatura ao longo do Cp na torção.

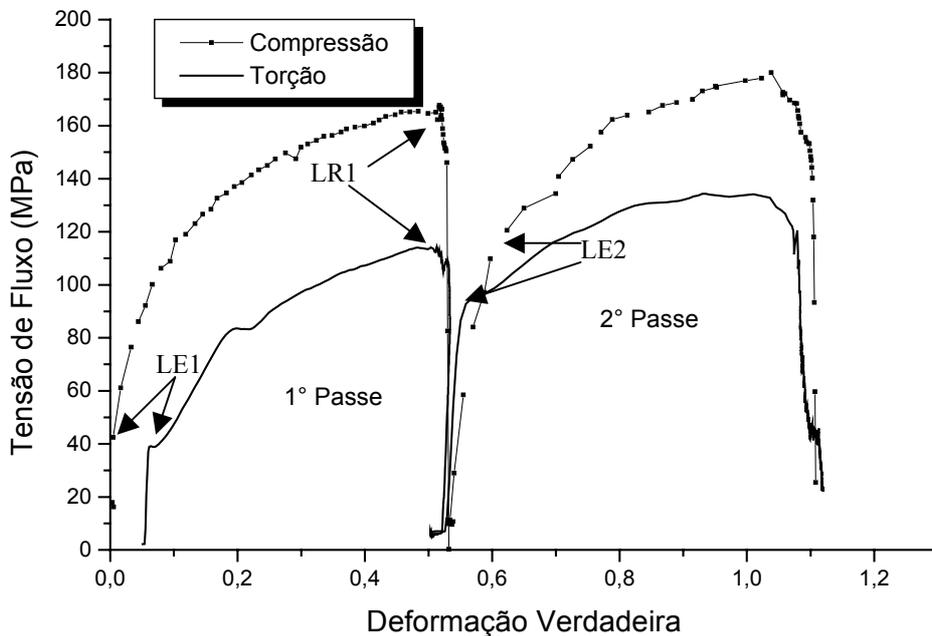


Figura 3. Curvas de fluxo nos ensaios de compressão e de torção do aço IF.

A Tabela 3 fornece as tensões médias de cada passe. Pode ser observado que a tensão média na compressão foi 59% superior ao valor obtido na torção, no 1º passe. No 2º passe, esta diferença foi de 25%.

Tabela 3. Tensões de fluxo médias, fração de recristalização entre passes, coeficiente de resistência e expoente de encruamento.

	Compressão		Torção	
	1° Passe	2° Passe	1° Passe	2° Passe
Tensão média (MPa)	139	145	87	116
Fração recristalizada (%)	39		58	
Coeficiente de resistência (MPa)	210	180	165	148
Expoente de encruamento	0,289	0,922	0,492	0,885

Na mesma Tabela é fornecida a fração recristalizada estaticamente (X) entre o 1° e o 2° passe, calculada de acordo com método descrito por Kilber e Schindler.⁽⁶⁾ Por este método, a fração X é obtida pela relação entre os limites de escoamento convencionais do 1° e 2° passes (LE_1 e LE_2 , na Figura 3), envolvendo, também, a tensão de fluxo máxima do 1° passe (LR_1 , na Figura 3), segundo a equação dada a seguir.

$$X = 100\% \cdot \left(\frac{LR_1 - LE_2}{LR_1 - LE_1} \right)$$

Pelos valores de fração recristalizada na Tabela 3, percebe-se que no ensaio de compressão o aço IF conseguiu amaciar mais entre os dois passes, 58%, em comparação à torção (39%), embora no primeiro ensaio o material tenha oferecido uma maior resistência à deformação (curvas de fluxo mais altas).

A Figura 4 mostra as curvas de variação da temperatura versus tempo durante o 1° e 2°, para os dois ensaios. Estas curvas foram obtidas por termopares soldados na superfície dos Cps, no meio da altura de sua parte útil. A comparação das Figuras 2 e 4 indica que o perfil térmico no ensaio de torção é muito mais fidedigno em relação ao programado que na compressão. Observa-se que somente na compressão houve um aumento de temperatura durante a deformação, conhecido como aquecimento adiabático, de 25°C no 1° passe e de 15°C no 2° passe.

O maior volume útil dos Cps de compressão (que dificulta um controle mais acurado da temperatura na Gleeble), a maior quantidade de deformação média que ocorre ao longo do corpo-de-prova e a existência de atrito entre Cp e as matrizes da Gleeble justificam a manifestação do aquecimento adiabático somente na compressão. Estes fatores foram também determinantes para o maior amaciamento entre passes na compressão.

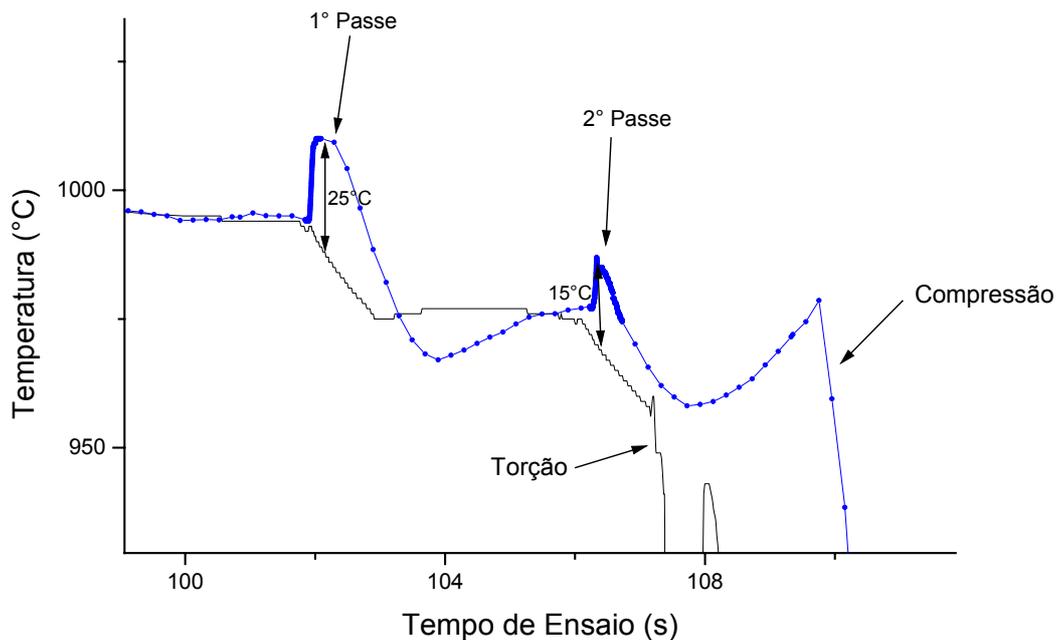


Figura 4. Perfil térmico obtido durante a deformação do aço IF, em dois passes nos ensaios de compressão e torção.

Na Tabela 3 são fornecidos ainda o expoente de encruamento (n) e o coeficiente de resistência (k) da equação de tensão (σ) versus deformação (ϵ) de Hollomon ($\sigma = k\epsilon^n$). Estes dois parâmetros foram obtidos pela linearização das curvas de fluxo no gráfico $\ln(\sigma)$ por $\ln(\epsilon)$. Com isto, n foi calculado como a inclinação do gráfico e k foi tomado como valor de σ na ordenada na origem.

Na Figura 5 são mostradas curvas de fluxo calculadas com os valores obtidos para K e n . Observa-se que as curvas reais (valores obtidos nos ensaios) e as calculadas ficaram muito próximas.

O parâmetro k da equação de Hollomon representa a tensão de fluxo para uma deformação verdadeira unitária ($\epsilon=1$). Portanto, o maior valor de k do aço IF no ensaio de compressão confirma que suas curvas de fluxo são mais elevadas que aquelas do ensaio de torção.

Já o expoente n indica a curvatura do gráfico da tensão de fluxo. Portanto, a torção forneceu, no 1º passe, um gráfico com menor curvatura, Figura 5. O maior encruamento neste passe deve estar ligado à menor temperatura verificada na torção relativamente à compressão. Kim e colaboradores⁽⁷⁾ citam resultado inverso em seu trabalho, o qual, por outro lado, foi verificado no 2º passe, Tabela 3. Na segunda deformação do aço IF, a temperatura de deformação foi mais baixa (o que implica em maior capacidade de encruamento nos dois ensaios) e o aquecimento adiabático na compressão foi menor. Portanto, o formato das curvas de fluxo foi diferente nos dois ensaios.

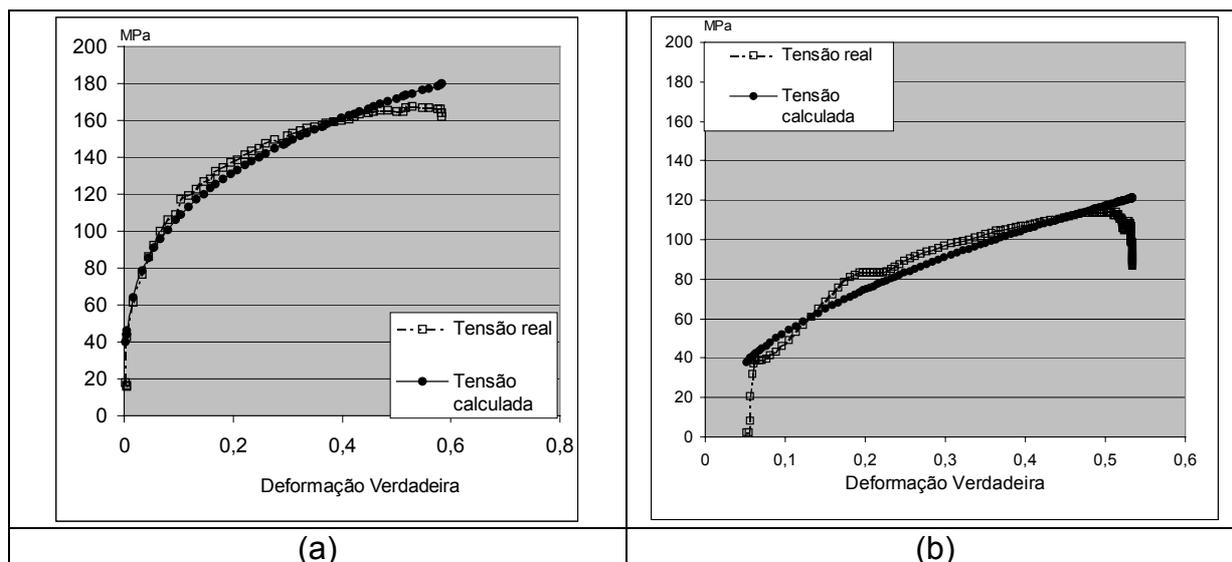


Figura 5. Curvas de tensão de fluxo reais e calculadas pela equação de Hollomon no 1º passe. (a) Ensaio de Compressão. (b) Ensaio de Torção.

A partir das tensões de fluxo média de cada passe, cargas de laminação foram calculadas pela equação de Sims.⁽⁸⁾ A Tabela 4 mostra os resultados obtidos e os compara aos valores reais de laminação (cargas industriais). Nota-se que a torção prevê menores valores enquanto a compressão estima uma maior magnitude. No entanto, a torção permitiu uma maior aproximação das cargas industriais.

Tabela 4. Cargas de laminação calculadas com o uso da tensão média de fluxo e com o emprego da equação de Sims⁽⁸⁾ e as cargas industriais de laminação.

	Ensaio de Compressão		Ensaio de Torção	
	1º passe	2º passe	1º passe	2º passe
Cargas calculadas (t)	2898	2496	2076	1784
Cargas industriais (t)	2405	1998	2405	1998
Desvio (%)	20,5	24,9	13,6	10,7

4 CONCLUSÕES

As curvas de fluxo obtidas na reprodução dos dois primeiros passes da laminação de acabamento de um aço IF com o emprego de ensaios de compressão cilíndrica e torção mostraram-se dissimilares. Os valores de tensão no ensaio de compressão foram maiores e o formato das curvas diferiu de um ensaio para o outro. Estas diferenças foram associadas à presença de atrito entre Cps e máquina no ensaio de compressão e ao melhor controle térmico e da taxa de deformação na torção.

A estimativa de cargas de laminação, a partir das tensões médias de fluxo, mostrou que a torção prevê menores valores em relação às cargas industriais. Já a compressão superestima os dados reais. Ressalta-se, no entanto, que a torção permitiu uma maior aproximação das cargas industriais.

REFERÊNCIAS

- 1 WONG, S. F.; HODGSON, P. D.; THOMSON, P. F. – Comparison of Torsion and Plane-strain Compression for Predicting Mean Strength in Single and Multiple-pass Flat Rolling Using Lead to Model Hot Steel – Journal of Materials Processing Technology, n. 53, 1995, p.: 601-616.
- 2 CHANDRA, T.; YUE, S.; JONAS, J. J.; ACKERT, R. J. – Strip Mill Simulation Using High Strain Rate Torsion Testing – Proceedings of Steel Rolling Conference, France, 1987, p.: F18.1-F18.8.
- 3 WHITTAKER, H. J. – The Use of Cam Plastometry and Torsion Testing for Simulating Hot-Strip Mill Rolling – Proceedings ICSTIS, Suppl. Transactions ISIJ, v. 11, 1971, p.: 662-666.
- 4 AKBEN, M. G. – Torsional Simulation of Plate Rolling of Two T1 - Microalloyed Steels – Proceedings of Steel Rolling Conference, France, 1987, p.: F19.1-F19.10.
- 5 RAO, K. P.; HAWBOLT, E. B.; McQUEEN, H. J.; BARAGAR, D. – Constitutive Relationships for Hot Deformation of Carbon Steel: A Comparison Study of Compression Tests and Torsion Tests – Canadian Metallurgical Quarterly, v. 32, n. 2, 1993, p.: 165-175.
- 6 KILBER, J.; SCHINDLER, I. – Recrystallization/Precipitation Behaviour in Microalloyed Steels – Journal of Materials Processing and Technology, v. 60, 1996, p.: 597-602.
- 7 KIM, S. I.; LEE, Y.; BYON, S. M. – Study on Constitutive Relation of AISI 4140 Steel Subject to Large Strain at Elevated Temperatures – Journal of Materials Processing and Technology, v. 140, 2003, p.: 84-89.
- 8 LARKE, E. C.; COOK, M. – The Rolling of Strip, Sheet and Plate – ch 5, Edited by Chapman and Hall, Ltd, London, 1957, p.: 174-202.