

EMPREGO DO ENSAIO DE TORÇÃO PARA A SIMULAÇÃO DA LAMINAÇÃO A QUENTE DE ACABAMENTO DE UM AÇO LIVRE DE INTERSTICIAIS AO TITÂNIO¹

*Kleiner Marques Marra²
Túlio Magno Füzessy de Melo²
Antônio Adel dos Santos³*

Resumo

Procurou-se reproduzir a laminação contínua de acabamento de tiras a quente de um aço do tipo livre de intersticiais (IF), microligado ao titânio, via ensaio de torção em um simulador termomecânico Gleeble. Nos primeiros passes de laminação visto que os elevados valores de taxa de deformação e curtos tempos entre os três últimos passes não permitiram um controle acurado da temperatura e da quantidade de deformação. Observou-se que há um apreciável amaciamento estático entre os primeiros passes para o aço IF avaliado. Este material mostrou também baixa susceptibilidade ao fenômeno da recristalização dinâmica para condições de altas taxas de deformação. Os valores calculados para a carga de laminação, a partir da tensão média obtida das curvas de fluxo dos ensaios de torção, ficaram sempre inferiores aos valores registrados na laminação industrial do aço IF.

Palavras-chave: Aço livre de intersticiais (IF); Ensaio de torção; Laminação a quente.

THE USE OF TORSION TEST TO SIMULATE THE HOT STRIP ROLLING OF A Ti-IF STEEL

Abstract

Torsion tests in a Gleeble machine were used to simulate the finishing hot rolling of a Ti-IF steel. Since a good control of temperature and strain was not possible in the three last torsion passes the simulation was able to include only the first three rolling passes. It could be concluded that there is a remarkable static softening between passes in the beginning of IF steel finishing rolling. A low dynamic recrystallization susceptibility of this steel was also observed, due to the high strain rate used in the simulations. The calculated rolling loads using mean flow stresses from the torsion simulations were lower than the industrially measured values.

Key words: Interstitial free steel (IF); Torsion test; Hot rolling.

¹ *Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ*

² *Membro da ABM; Pesquisador, Dr., Superintendência do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas; Ipatinga, MG.*

³ *Membro da ABM; Pesquisador, M.Sc., Superintendência do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas; Ipatinga, MG.*

1 INTRODUÇÃO

Freqüentemente se lança mão de ensaios mecânicos, como os ensaios de tração, de compressão, ou de torção, para a avaliação da conformabilidade ou para a previsão do comportamento de materiais metálicos sob condições específicas de deformação a quente. Assim, o emprego destes ensaios possibilita que condições de laminação industriais, usuais ou não, relativamente à quantidade de deformação, temperatura e taxa de deformação, possam ser testadas a um custo relativamente baixo e sem riscos à integridade dos laminadores.

Para efeito de determinação de curvas de tensão versus deformação a quente, ou curvas de fluxo, o ensaio de tração uniaxial, dos testes mecânicos supracitados, é o que apresenta a maior restrição. Isto acontece em razão da existência do fenômeno da estricção, que se manifesta pouco acima de 0,2 de deformação verdadeira para aços e ligas de alumínio.⁽¹⁾ Deve ser observado que se atingem deformações de até 3,5 em alguns processos de conformação, tal como na extrusão.⁽²⁾ Na laminação de acabamento de tiras a quente chega-se a valores de deformação verdadeira acumulada superiores a 2,0.

No ensaio de compressão uniaxial simétrica, também chamado de compressão axissimétrica, por usar corpos-de-prova (cps) cilíndricos, o atrito entre material e partes do equipamento de ensaio (punções) 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 aplicada nesse ensaio é de 0,7.⁽³⁾ Isto é um grande problema pois esse valor é freqüentemente suplantado nas operações de laminação. Por outro lado, o ensaio de compressão em estado plano, que difere da compressão axissimétrica por utilizar um cp no formato de chapa retangular, permite atingir valores um pouco maiores de redução.⁽³⁾

No tocante ao teste de torção, pode-se aplicar elevadas quantidades de deformação sem que haja estricção ou mesmo a ruptura do material. Uma outra característica da torção é a ausência de atrito entre cps e componentes das máquinas de ensaio. No entanto, a grande vantagem deste teste em relação aos outros é a sua capacidade de impor elevadas taxas de deformação, compatíveis com os valores empregados no final da laminação de acabamento de aços (valores superiores a 100 s^{-1}). Por isto, este ensaio, embora não tão difundido como os ensaios de tração e compressão, e mesmo não normalizado, tem sido muito empregado nos últimos anos no estudo de metais sob condições severas de deformação a quente.

Na torção, a taxa de deformação é variada pela velocidade de rotação do eixo da máquina de ensaio, onde são fixados os cps. Já a quantidade de deformação é imposta através do ângulo de giro aplicado aos cps. Os cps normalmente possuem seção reta circular (geometria cilíndrica) para simplificar o cálculo da tensão cisalhante de deformação.

Para a conversão do modo de deformação, de torção para compressão plana, e a obtenção dos parâmetros de deformação na laminação de chapas de aço - que são a tensão de fluxo (k_f), a deformação verdadeira (ϵ) e a taxa de deformação ($\dot{\epsilon}$) - aplicam-se as relações dadas a seguir, que foram estabelecidas levando-se em conta o critério de escoamento de Von Mises.⁽⁴⁾

$$k_f = \sqrt{3} \frac{1}{2\pi a^3} M_T (3 + m + n) \quad (\text{eq. 1})$$

$$\varepsilon = \frac{2\pi a N}{\sqrt{3} L} \quad (\text{eq. 2})$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{2\pi a \dot{N}}{\sqrt{3} L} \quad (\text{eq. 3})$$

onde:

M_T = Torque aplicado ao cp de torção;

m = Sensibilidade da tensão à taxa de deformação na torção $\left(= \frac{\partial \log(\tau)}{\partial \log(\dot{N})} \right)$

n = Taxa de encruamento na torção $\left(\frac{\partial \log(\tau)}{\partial \log(N)} \right)$, podendo ser também tomada como

$$\left(\frac{\partial M_T}{\partial \theta} \right);$$

τ = Tensão cisalhante na torção;

a = Raio do cp cilíndrico;

L = Comprimento útil do cp cilíndrico;

N = Número de rotações durante torção;

\dot{N} = Velocidade de rotação do cp durante torção;

θ = Ângulo de rotação do cp durante torção.

Neste trabalho empregou-se, então, o ensaio mecânico de torção a quente, executado num simulador termo-mecânico Gleeble, para reproduzir a laminação contínua de acabamento de tiras a quente de um aço IF microligado ao titânio. Procurou-se reproduzir as condições de processamento industrial em termos de temperatura e quantidade de deformação de cada passe da laminação, bem como as taxas de deformação aplicadas nestes passes e os intervalos de tempo entre passes. As cargas calculadas para os passes simulados foram comparadas com os valores obtidos industrialmente e foram feitas análises a respeito das características de amaciamento estático (entre passes) e dinâmico (durante deformação) do aço IF avaliado.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foi utilizado um aço do tipo IF, microligado ao titânio na espessura de 28 mm, com teor de carbono de 25 ppm e teor de titânio de 680 ppm. Este material, proveniente do topo de um esboço industrial, foi amostrado quando da sua entrada no Trem de Laminação de Acabamento da Linha de Tiras a Quente da Usiminas, sendo resfriado rapidamente por imersão em água. A laminação de acabamento do

aço IF consta de 6 passes, sendo iniciada a cerca de 1000°C e finalizada em torno de 900°C. São aplicadas taxas crescentes e quantidades decrescentes de deformação. Num simulador termomecânico Gleeble, modelo 3500, foram realizados os ensaios de torção a quente reproduzindo as condições de laminação industrial. Isto foi feito com o intuito de se determinar as curvas de fluxo do aço IF. A Figura 1 dá uma visão geral da máquina Gleeble e detalhes da câmara onde foram realizados os ensaios de torção a quente.



Figura 1. Simulador termomecânico Gleeble modelo 3500. (a) Aspecto geral do equipamento. (b) Câmara de ensaio de torção.

O cp de torção foi escolhido de forma a ser possível imprimir grandes taxas deformações, superiores a 100 s^{-1} . Para isto, as suas dimensões foram de:

- (i) comprimento útil igual a 3,2 mm;
- (ii) diâmetro útil de 9,5 mm.

Na simulação da laminação só foi possível a reprodução dos 3 primeiros passes. Isto se deu em razão de, após o 3º passe, as taxas de deformação reais serem muito altas (acima de 50 s^{-1}) e os intervalos entre os passes serem extremamente curtos (de décimos para centésimos de segundos). Com isto ficou muito difícil controlar acuradamente a quantidade de deformação aplicada por torção, em razão da inércia da máquina, e a temperatura dos passes 4, 5 e 6, devido ao aquecimento “adiabático” proveniente dos passes anteriores. Assim, não se conseguiu, no simulador Gleeble, uma reprodução fidedigna das condições reais de deformação dos últimos passes. Portanto, as curvas de fluxo foram estabelecidas somente até a metade da laminação de acabamento.

Das curvas de fluxo obtidas, foi calculada a tensão média de cada passe por integração numérica. Posteriormente, calcularam-se as cargas de laminação correspondentes ao 1º, 2º e 3º passes, a partir da tensão de fluxo média, sendo os resultados comparados aos valores industriais. Para o cálculo das cargas, foram utilizadas três equações consagradas da literatura, ou seja, equação de Sims, equação de Orowan e equação de Ekelund.⁽⁵⁾

Visto não ter sido possível a realização da seqüência dos seis passes de laminação, realizou-se, então, em outra série de ensaios, um único passe equivalente à deformação acumulada ao longo da laminação de acabamento, ou seja, 2,2. Isto foi feito em dois níveis de temperatura, num patamar referente à temperatura aplicada na 1ª cadeira de laminação (1º passe), 996°C, e em outro nível

equivalente à última cadeira (6° passe), 906°C. Foi utilizada uma taxa de deformação igual a 24 s^{-1} , que corresponde à taxa média ao longo da laminação de acabamento, determinada pela relação entre a quantidade de deformação total pelo tempo de deformação acumulado nos seis passes. Procurou-se com isto verificar se o aço IF apresenta tendência de amaciamento durante deformação a quente.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A reprodução da seqüência dos três primeiros passes da laminação, em termos de curvas de fluxo, está mostrada na Figura 2. Nesta Figura são dadas as condições de ensaio em relação à temperatura, quantidade e taxa de deformação, além da tensão média de fluxo obtida em cada passe. Observa-se que, a despeito da temperatura ser diminuída e a taxa de deformação ser aumentada, não há um crescimento destacado da tensão média com a evolução dos passes. Pode ser verificado, inclusive, que este parâmetro foi praticamente o mesmo no 2° e no 3° passe.

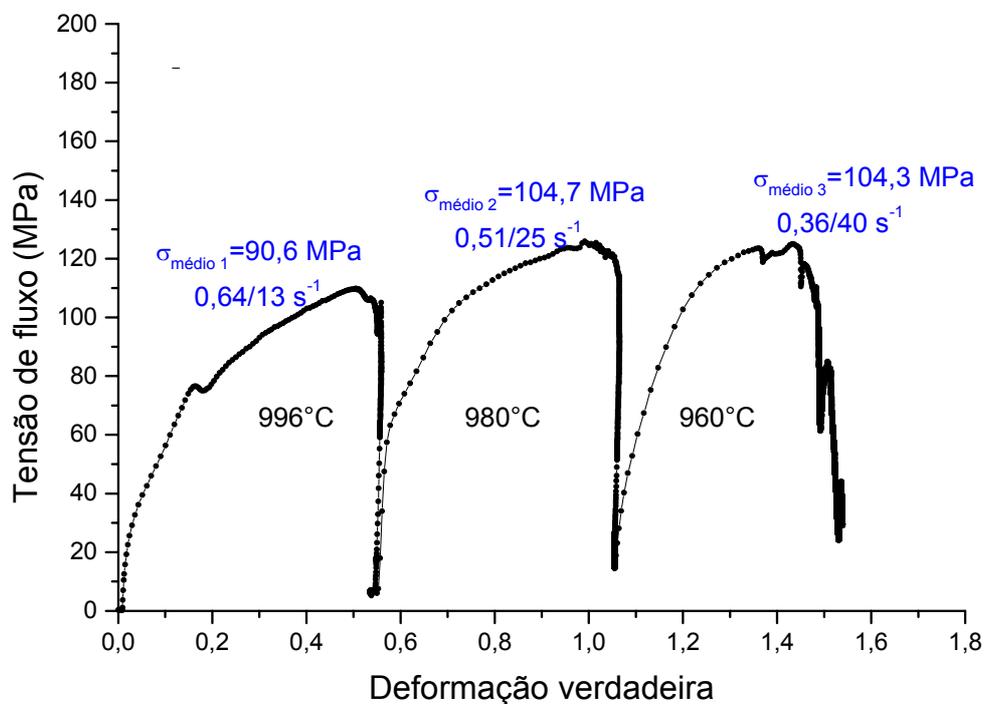


Figura 2. Seqüência dos três primeiros passes da laminação de acabamento de tiras a quente reproduzidos por torção para o aço IF.

Para se estimar o grau de amaciamento entre passes, utilizou-se uma técnica similar ao método *off set* descrito na literatura,⁽⁶⁾ sendo relacionadas as tensões de fluxo limiaries de deformação plástica (usado o critério do limite de escoamento a 0,2% de deformação) dos passes anterior e posterior e a máxima tensão do passe anterior. Deve ser comentado que no método *off set* original,⁽⁶⁾ diferentemente do que foi feito neste estudo, aplicam-se ao aço passes sucessivos com a mesma taxa e quantidade de deformação. Por isto, os resultados obtidos devem ser analisados em caráter indicativo. A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos, onde se observa que houve amaciamento entre os três passes simulados. Este amaciamento deve ter

ocorrido principalmente por recristalização estática, uma vez que o aço IF, por apresentar baixa energia de falha de empilhamento, possui baixa propensão à recuperação estática.⁽⁶⁾

Chama-se também a atenção para o resultado mostrado entre o segundo e terceiro passes. Os 104% de fração recristalizada não significam necessariamente que o material amaciou completamente, indicando apenas que houve um considerável amaciamento entre esses passes.

Tabela 1. Fração recristalizada entre os passes simulados.

Entre o 1° e o 2° passes.	65%
Entre o 2° e o 3° passes.	104%

Com os valores de tensão média obtidos na seqüência dos três passes foi estimada a carga de laminação para cada um dos aços. Esta estimativa foi feita, como já dito, com o emprego de três diferentes equações (Sims, Ekelund e Orowan).

A Tabela 2 mostra as cargas de laminação estimadas e as cargas medidas industrialmente. Observa-se que os valores previstos sempre foram inferiores aos valores reais. Isto está certamente relacionado com a ausência de atrito no ensaio de torção e, também, com a dissimilaridade da distribuição de tensão/deformação entre o ensaio e a laminação.

Relativamente aos valores das cargas industriais, pode ser visto na Tabela 2 que dentre as três equações estimativas da força de laminação, a equação de Sims forneceu sempre o menor desvio.

Pode ser notado ainda que o desvio entre os valores estimados e industriais foram reduzidos com a evolução da laminação. Isto pode ser atribuído certamente à redução da importância do atrito com o aumento da tensão necessária para deformar o aço (com a redução da temperatura e aumento da taxa de deformação) e com a própria redução da quantidade de deformação.

Tabela 2. Cargas estimadas pela tensão média de fluxo e cargas industriais medidas nos três primeiros passes da laminação de acabamento do aço IF.

Carga	t	1° passe	2° passe	3° passe
Sims	Valor	2076	1784	1800
	Desvio (%)	13,7	10,7	0,4
Ekelund	Valor	1823	1603	1636
	Desvio (%)	24,2	19,8	8,7
Orowan	Valor	2024	1602	1619
	Desvio (%)	15,8	19,8	9,6
Cargas industriais medidas	Valor	<u>2405</u>	<u>1998</u>	<u>1792</u>

A Figura 3 mostra as curvas de fluxo para o aço IF sob a deformação correspondente ao valor acumulado ao longo da laminação de acabamento, em dois níveis de temperatura, referentes ao primeiro passe (996°C) e ao último passe (906°C) de laminação. Isto foi feito para se avaliar a tendência do aço IF ao amaciamento dinâmico ao longo da laminação.

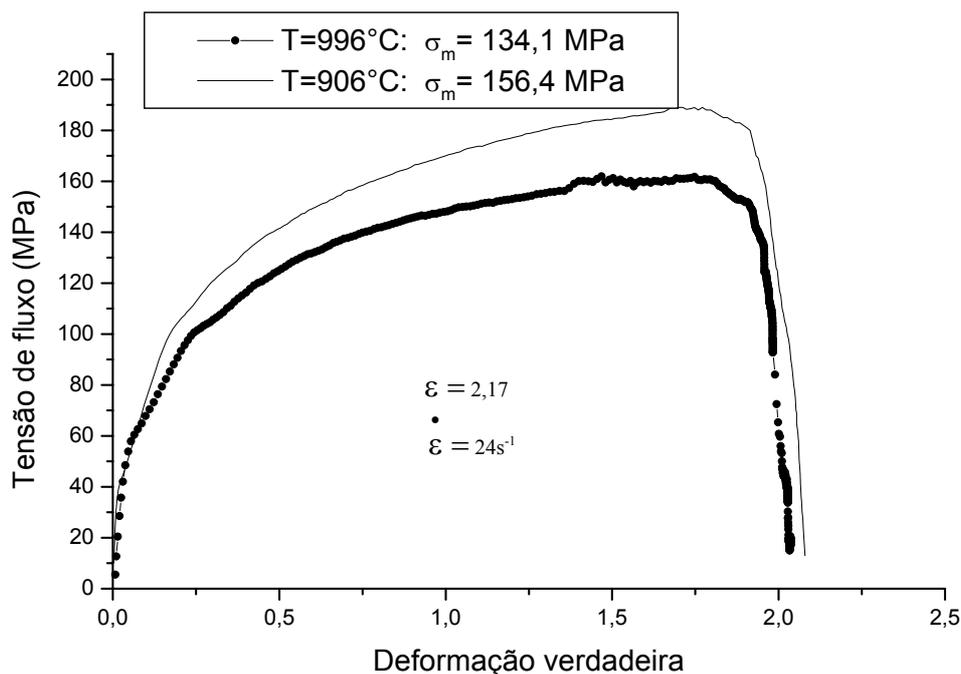
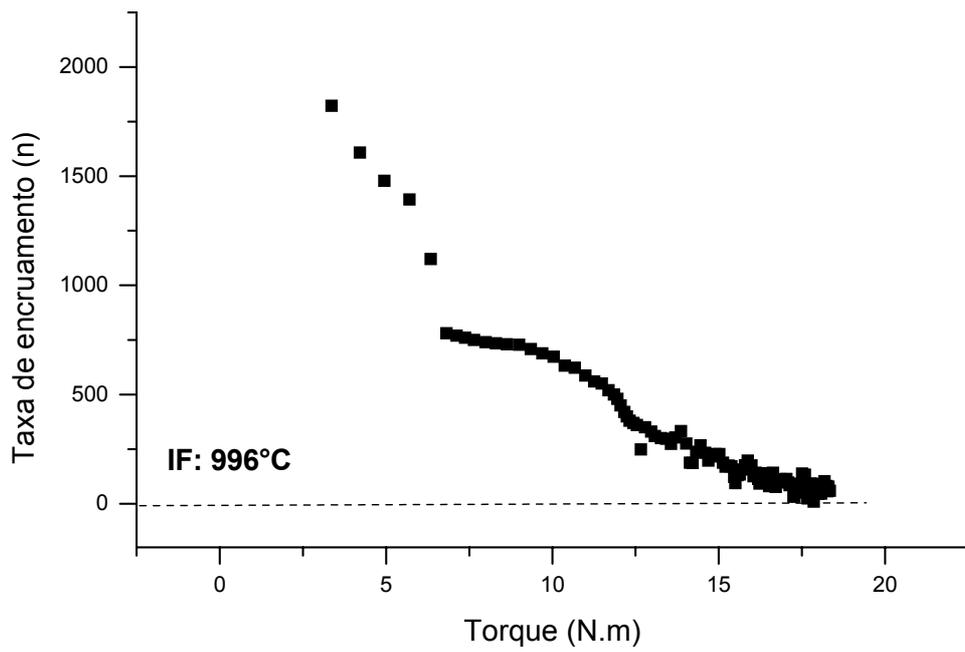


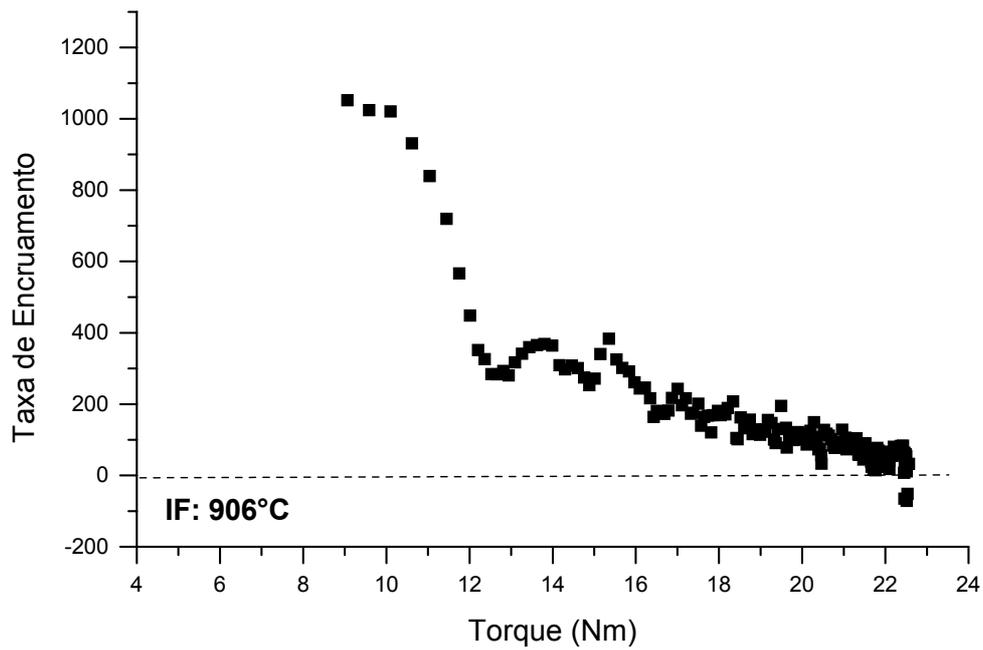
Figura 3. Tensão de fluxo versus deformação no ensaio de torção para o aço IF.

Pode ser visto na Figura 3 que o aço IF ofereceu maior resistência à deformação na menor temperatura. Observa-se também que não houve o atingimento de uma tensão de pico seguido de uma redução abrupta da tensão de fluxo. Isto significa que não ocorreu a recristalização dinâmica, pelo menos de modo significativo, em nenhum dos dois passes, o que pode também ser confirmado pela evolução da taxa de encruamento n durante os passes de deformação. Se for tomada esta taxa como a derivada do torque M em relação ao ângulo de torção, ou seja $\frac{\partial M}{\partial \theta}$, então pode ser visto na Figura 4 que o aço IF apresenta uma queda praticamente contínua de n durante os dois ensaios, a 996°C e a 906°C. Esta queda de n significa que o material está encruando a taxas decrescentes, mas que não se atingiu a condição de encruamento para a ocorrência da recristalização dinâmica ($n=0$). No entanto, ao longo da deformação houve certamente recuperação dinâmica, nas duas temperaturas, em razão da redução contínua da taxa de encruamento.

Cabe comentar que alguns pesquisadores^(7,8) têm registrado a ocorrência de recristalização dinâmica em aços IF ao Ti para quantidades de deformação inferiores a 1,0, na faixa de temperaturas de 900°C a 1000°C, porém sob baixos valores de taxa de deformação ($<1,0 \text{ s}^{-1}$). Isto não está em desacordo com os resultados obtidos no presente trabalho, uma vez que é conhecido⁽⁹⁾ que à medida que se aumenta a taxa de deformação, há uma concomitante elevação do valor da deformação crítica para a ocorrência da recristalização dinâmica.



(a)



(b)

Figura 4. Taxa de encruamento versus torque em ensaio de torção. (a) $T=996^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon} = 2,17$ e $\dot{\epsilon} = 24 \text{ s}^{-1}$. (b) $T=906^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon} = 2,17$ e $\dot{\epsilon} = 24 \text{ s}^{-1}$.

4 CONCLUSÕES

Não foi possível a execução dos três últimos passes de laminação no teste de torção, via simulador Gleeble. Para estes passes, em razão das altas taxas de deformação e curtos tempos entre passes, não se conseguiu um bom controle da temperatura e da quantidade de deformação.

A simulação dos primeiros três passes de laminação mostrou que há um apreciável amaciamento estático entre passes para o aço IF. Este material mostrou também baixa susceptibilidade ao fenômeno da recristalização dinâmica para condições de alta taxa de deformação, referente ao valor médio praticado industrialmente na laminação de acabamento de tiras a quente, tanto na temperatura de entrada como na temperatura de saída da laminação.

As cargas de laminação dos três primeiros passes, estimadas pela tensão média de fluxo obtida no ensaio de torção, foram inferiores aos valores industriais. Isto foi atribuído à ausência de atrito no ensaio de torção e às diferenças entre as características de deformação na torção e na laminação. Para a previsão das cargas foram utilizadas três equações tomadas da literatura, sendo que a equação de Sims mostrou-se mais precisa que as equações de Ekelund e de Orowan.

REFERÊNCIAS

- 1 KILBER, J.; SCHINDLER, I. Recrystallization/Precipitation Behaviour in Microalloyed Steels, *Journal of Materials Processing and Technology*, V. 60, 1996, p.: 597-602.
- 2 HELMAN, H; CETLIN, P. R. Forjamento/Laminação de Chapas, IN: *Conformação Mecânica*, UFMG, Belo Horizonte (MG), 1980, p.: 7.1-8.71.
- 3 CHANDRA, T. Strip Mill Simulation Using High Strain Rate Torsion Testing, *Proceedings of Steel Rolling Conference, France*, 1987, p.: F18.1-F18.8.
- 4 POLIAK, E. I.; JONAS, J. J. State of the Art of the Torsion Test for Determination Flow Curves, *Steel Research*, 61, No 5, 1990, p.: 212-218.
- 5 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.
- 6 PADILHA, A. F.; SICILIANO JR, F. Encruamento, Recristalização, Crescimento de Grão e Textura, ABM, São Paulo, 1996, 158p.
- 7 PINHEIRO, I. P.; BARBOSA, R.; CETLIN, P. R. Effect of Strain Path on the Dynamic Restoration of Interstitial Free Steel in the Austenitic Temperature Range, *Scripta Materialia*, V. 52, 2005, p.: 639-644.
- 8 JORGE JR, A. M.; REGONE, W.; BALANCIN, O. Effect of Competing Hardening and Softening Mechanisms on the Flow Stress Curve Modeling of Ultra-low Carbon Steel at High Temperatures, *Journal of Materials Processing Technology*, No 142, 2003, p.: 415-421.
- 9 CARSI, M.; LÓPEZ, V.; PENALBA, F.; RUANO, O. A. The Strain Rate as a Factor Influencing the Hot Forming Simulation of Medium Carbon Microalloyed Steels, *Materials Science and Engineering*, A216, 1996, p.: 155-160.