

Análise do comportamento mecânico de um aço estrutural através de ensaios de torção

Analysis of mechanical behavior of a structural steel through torsion tests

Mariana Valinhos Barcelos

Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais
Instituto Federal do Espírito Santo
Vitória, ES, Brasil
mvalinhos@ifes.edu.br

Estéfano Aparecido Vieira

Doutor, Professor do Departamento de
Metalurgia e Materiais
Instituto Federal do Espírito Santo
Vitória, ES, Brasil
estefanovieira@ifes.edu.br

Nilton José Lucinda de Oliveira

Mestre,
Pesquisador do Centro Tecnológico
CETEC SENAI - Belo Horizonte, MG, Brasil
nilton.oliveira@cetec.mg.gov.br

Marcelo Lucas Pereira Machado

Doutor, Professor do Departamento de
Metalurgia e Materiais
Instituto Federal do Espírito Santo
Vitória, ES, Brasil
marcelolucas@ifes.edu.br

Resumo

As mudanças no comportamento de amaciamento que ocorrem durante a deformação a quente de um aço estão diretamente ligadas a parâmetros como deformação, taxa de deformação, temperatura, tempo de espera entre passes e taxa de resfriamento. Um aço estrutural foi estudado através de ensaio de torção a quente. Os corpos de prova foram usinados a partir de esboços do aço, sendo retirados após a laminação de desbaste. Foram realizados ensaios de torção isotérmicos e ensaios de torção com múltiplas deformações em resfriamento contínuo no laboratório de conformação mecânica do CETEC, em Belo Horizonte-MG. Através das curvas de escoamento plástico, geradas pelos ensaios de torção isotérmicos, foram determinadas a tensão e a deformação de pico para temperaturas variando de 1150°C à 650°C e foram realizadas análises metalográficas das amostras para se verificar o comportamento do tamanho de grão do material. Foi realizado cálculo das temperaturas críticas (T_{nr} e A_{r3}), através da utilização de equações disponíveis, na literatura. Tal cálculo foi comparado com os valores obtidos durante o ensaio com múltiplas deformações em resfriamento contínuo e verificado que a variação não passou de 1,8%.

Palavras-chave: Ensaio de torção, aço estrutural, curvas de escoamento plástico.

Abstract

The softening behavior changes that occur during hot deformation of steel is directly related to processing parameters such as strain, strain rate, temperature, interpass time and cooling rate. A structural steel was analyzed by hot rolling simulation using hot torsion tests. The specimens were machined from work piece after roughing mill. Isothermal torsion and multiple strains in continuous cooling torsion tests were performed in hot deformation laboratory of CETEC, in Belo Horizonte-MG. Peak stress and strain for temperatures ranging from 1150°C to 650°C were determined through flow curves generated by isothermal torsion tests and metallographic analysis were performed to verify the behavior of grain size of the material. The critical temperatures (T_{nr} and A_{r3}) were calculated by equations available in literature and compared to values obtained from the test flow curves (the variation did not exceed 1.8%).

Keywords: Torsion test, structural steel, flow curves.

1. Introdução

Pesquisas dos processos de conformação mecânica são essenciais para otimizar a produtividade e melhorar as propriedades mecânicas das ligas conformadas, reduzindo-se os custos. Um método eficiente com custo relativamente reduzido é a utiliza-

ção do ensaio de torção a quente, que consiste em uma técnica experimental capaz de reproduzir as condições de trabalho de conformação. Isso permite investigar os mecanismos que estão operando, através de curvas de escoamento plástico e do acompanhamento

$$\sigma_{eq} = \frac{\sqrt{3} \cdot \pi \cdot (3+m+n)}{2\pi r^3} \quad (1)$$

Onde σ_{eq} , τ e r são, respectivamente, a tensão equivalente, o torque e o raio da

amostra. Considerando que os valores de m e n são, respectivamente, iguais a 0,17

$$\varepsilon_{eq} = \frac{r \cdot \theta}{\sqrt{3} \cdot L} \quad (2)$$

Sendo ε_{eq} , θ , r e L , respectivamente, a defor-

mação equivalente, ângulo de torção, raio

da evolução microestrutural [Jorge et al., 1993; Regone, 2001; Jorge et al., 2003]. Com a leitura do torque e do ângulo, é possível calcular a tensão e a deformação equivalentes. A tensão é calculada através da Eq. 1 [Fields et al., 1957]:

e 0,13, a deformação é calculada através da Eq. 2 [Semiatin et al., 1985]:

da área útil e o comprimento da amostra.

2. Procedimentos experimentais

Utilizou-se um aço cedido pela ArcelorMittal Cariacica após a laminação

de desbaste, conforme faixa de composição da Tabela 1, para fabricação dos cor-

pos de prova com região útil de 7mm de diâmetro e 15mm de comprimento.

Faixa	C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni	Sn	Mo	Nb
Min	0,10	0,60	0,15	-	-	-	-	-	-	-	0,02
Máx	0,16	1,10	0,35	0,04	0,05	0,25	0,2	0,25	0,07	0,05	0,04

Tabela 1
Faixa de composição química do aço estrutural estudado.

Ensaio com múltiplas deformações em resfriamento contínuo

Esses ensaios geram curvas que permitem a determinação das temperaturas críticas de processamento do material, sendo elas: T_{nr} , A_{r3} e A_{r1} . Os corpos de

prova foram aquecidos até a temperatura 1200°C a uma taxa média de aquecimento de 2°C/s e mantidos, nessa temperatura, por 2 min. Em seguida, foram resfria-

dos a uma taxa de 1°C/s, aplicando-se passes com deformação de 0,2, sendo a primeira deformação a 1170°C e as demais em intervalos de 30°C até 660°C.

Ensaio de torção isotérmico

Esses ensaios fornecem dados sobre o comportamento mecânico do material e podem-se determinar, através dele, os valores da tensão e deformação de pico. Os corpos de prova foram aquecidos até a temperatura

1200°C a uma taxa média de aquecimento de 2°C/s e mantidos, nessa temperatura, por 2 min. Em seguida, foram resfriados a uma taxa de 1°C/s até a temperatura do ensaio e mantidos, nessa temperatura, por mais 2 min. A

taxa de deformação utilizada foi de 0,3 s⁻¹, deformação máxima de 3 e com as temperaturas de ensaio decrescendo de 1150°C a 650°C em intervalos de 50°C. Após os ensaios, as amostras foram resfriadas ao ar.

Cálculo das temperaturas críticas

Utilizando as Equações 3 e 4 [Macagno et al., 1994], calcularam-se as

temperaturas críticas T_{nr} e A_{r3} , para compará-las com os valores obtidos pelo

ensaio com múltiplas deformações em resfriamento contínuo.

$$T_{nr} = 897 + 464 \cdot C + (6445 \cdot Nb - 644 \sqrt{Nb}) + (732 \cdot V - 230 \sqrt{V}) + 890 \cdot Ti + 363 \cdot Al - 357 \cdot Si \quad (3)$$

$$A_{r3} = 910 - 310 \cdot C - 80 \cdot Mn - 20 \cdot Cu - 15 \cdot Cr - 55 \cdot Ni - 80 \cdot Mo + 0,35 (t - 8) \quad (4)$$

Análise metalográfica

Foi realizada análise microestrutural com objetivo de identificar a presença de deformação acumulada

(encruamento) e os grãos recristalizados. As técnicas de preparação das amostras, para observação micro-

estrutural, foram as convencionais, ou seja, as amostras foram cortadas perpendicularmente ao comprimen-

to, embutidas, lixadas com lixas de 400, 600, 800 e 1200 *mesh*, polidas em panos com pasta de diamante com

granulometria de 3 μm e de 1 μm e atacadas com nital por 30s. O microscópio ótico utilizado foi um Mettallux

3 da marca Leitz do laboratório da ArcelorMittal Tubarão.

3. Resultados e discussão

Ensaio com múltiplas deformações em resfriamento contínuo

Na Figura 1, é possível observar que o material apresentou deformação homogênea por toda a região útil do corpo de prova, após o ciclo de deformações aplicado.

A Figura 2 apresenta as curvas tensão versus deformação obtidas durante esse ensaio. É possível observar a variação da tensão em relação à mudança de temperatura na qual é aplicada a deformação. Nota-se que, para temperaturas acima de 960°C, a tensão aumenta, moderadamente, com a diminuição da temperatura, evidenciando a região de

recristalização da austenita e que, em temperaturas menores do que 960°C, há um aumento mais acentuado no crescimento da tensão, caracterizando a região de encruamento da austenita, ou seja, 960°C corresponde à T_{nr} (temperatura de não recristalização). Posteriormente, a queda da tensão observada, em torno de 780°C, evidencia a transformação austenita-ferrita, que é o início da região intercrítica ($\gamma+\alpha$) ou A_{r3} do diagrama Fe-Fe₃C. Finalmente, tem-se o aumento da tensão novamente com a diminuição da temperatura, evidenciando formação da

perlita, que é o início da região ferrítica-perlítica ou A_{r1} . Na Figura 2 (B), é possível observar a relação da tensão média equivalente com o inverso da temperatura. Através da análise das curvas dessa figura, é possível determinar, mais precisamente, os valores de T_{nr} , A_{r1} e A_{r3} . Esses dados são mostrados na Tabela 2, onde podem ser comparados com os valores obtidos através da utilização das Equações 3 e 4. Observa-se que a diferença entre o valor obtido pelo ensaio e o valor calculado é de 1,8% para T_{nr} e de 1,3% para A_{r3} .

Figura 1
Fotografia mostrando a região útil do CP (A) sem deformação e (B) após a deformação.

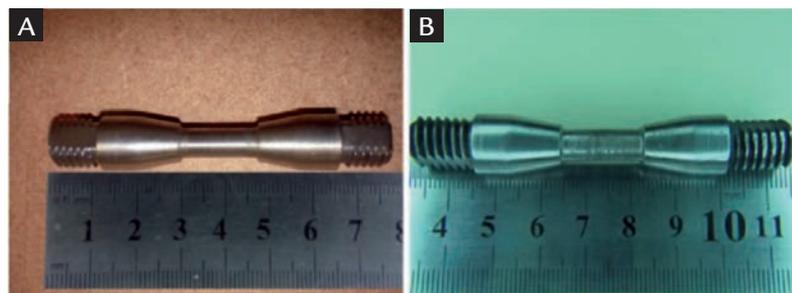


Figura 2
(A) Curvas tensão versus deformação para ensaio de torção a quente sob resfriamento contínuo.
(B) Curva de tensão média versus o inverso da temperatura mostrando as temperaturas T_{nr} , A_{r3} e A_{r1} obtidas através do ensaio para o aço em estudo.

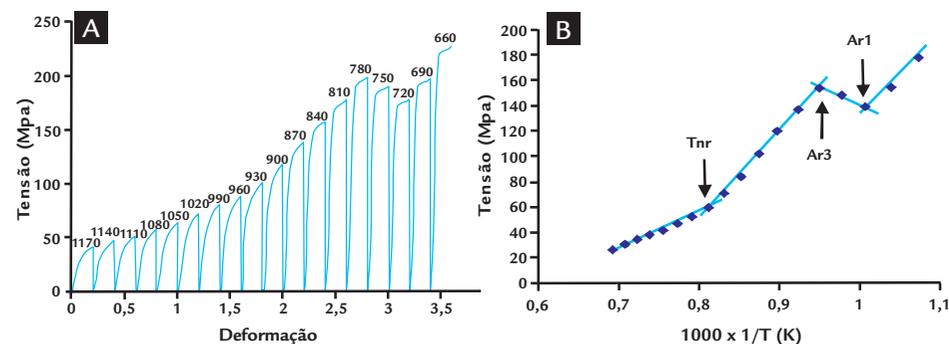


Tabela 2
Valores de T_{nr} , A_{r3} e A_{r1} , determinados pelo ensaio e valores calculados.

	T_{nr}	A_{r3}	A_{r1}
Ensaio	960	780	720
Calculado	942	790	-

Ensaio de torção isotérmico

Conforme pode ser observado na Figura 3, as curvas de escoamentos plásticos foram separadas em duas figuras: temperaturas igual e maiores que 900°C e temperaturas igual e menores que 850°C.

Os resultados isotérmicos mostram que o limite de escoamento aumenta à medida que a temperatura decresce. Diminuir a temperatura restringe a mo-

bilidade das discordâncias, causando o aumento do limite de escoamento. A Figura 3 (A) mostra que, em temperaturas igual e maiores do que 900°C, têm-se curvas de escoamento plástico com a forma típica de materiais que se recristalizam dinamicamente, ou seja, nessas curvas, inicialmente, a tensão de escoamento plástico aumenta com a deformação até um valor máximo, sendo

que, em seguida, há uma diminuição da tensão até um estado estacionário. No entanto, em temperaturas igual e menores do que 850°C, a forma das curvas é variável porque algumas deformações foram aplicadas em região intercrítica ($\gamma+\alpha$) e também na região ferrítica-perlítica. Nessas regiões, os mecanismos de amaciamento são complexos e interativos e são influenciados pela fração volumétri-

ca das fases presentes. Existe, também, a possibilidade de ocorrer transformações de fases induzidas pela deformação. Primeiramente acontece um endurecimento brusco em um curto período de deformação, apresentando, assim, uma alta taxa de endurecimento até se atingir um pico de tensão, seguido de um estado estacionário e/ou queda contínua da tensão com a deformação, causado pelo processo de recuperação dinâmica e outros mecanismos. A queda contínua da tensão pode ter sido causada por algum tipo de estricção ocorrida no corpo de prova ou transformação $\gamma \rightarrow \alpha$ induzida por deformação. Esse comportamento pode ser observado na Figura 3 (B). A partir desses resultados, foi construída a Tabela 2, com os valores de tensão e deformação de pico para temperaturas igual e maiores que 900°C e tensão do estado estacionário

para todas as temperaturas. Na Figura 4, é possível ver os corpos de prova com a região deformada e as microestruturas obtidas para cada um.

Observa-se, na Figura 4, que o material apresentou deformação homogênea por toda a região útil do corpo de prova, após o ciclo de deformação aplicada, durante o ensaio, para todas as temperaturas. As microestruturas obtidas mostram um refinamento do grão para temperaturas de deformação mais baixas. Esse comportamento é observado até uma faixa de temperatura entre 800 e 850°C, aproximadamente. A partir de 800°C, reduzindo-se a temperatura têm-se somente o encruamento dos grãos de ferrita. Isto ocorre porque, com a formação da ferrita, cessam-se os processos de recristalização e o principal mecanismo de amaciamento é a recuperação. Esses re-

sultados estão de acordo com os obtidos em trabalhos de outros autores [Regone, 2001; Geittens, 2001], para aços do tipo IF e ao carbono, respectivamente. Portanto, desejando-se uma microestrutura mais refinada, durante um processo de laminação a quente, recomenda-se executar os passes finais sob temperaturas entre 850 e 900°C. Contudo não deve-se deixar de levar em conta os esforços a que serão submetidos os equipamentos de conformação. Entretanto, em processos industriais de laminação a quente, as deformações, em cada passe, são, geralmente, menores que as deformações de pico mostradas na Figura 3 e a recristalização dinâmica raramente ocorre. Portanto a melhor previsão das mudanças microestruturais que ocorrem durante a laminação a quente deve levar em conta as temperaturas críticas determinadas na

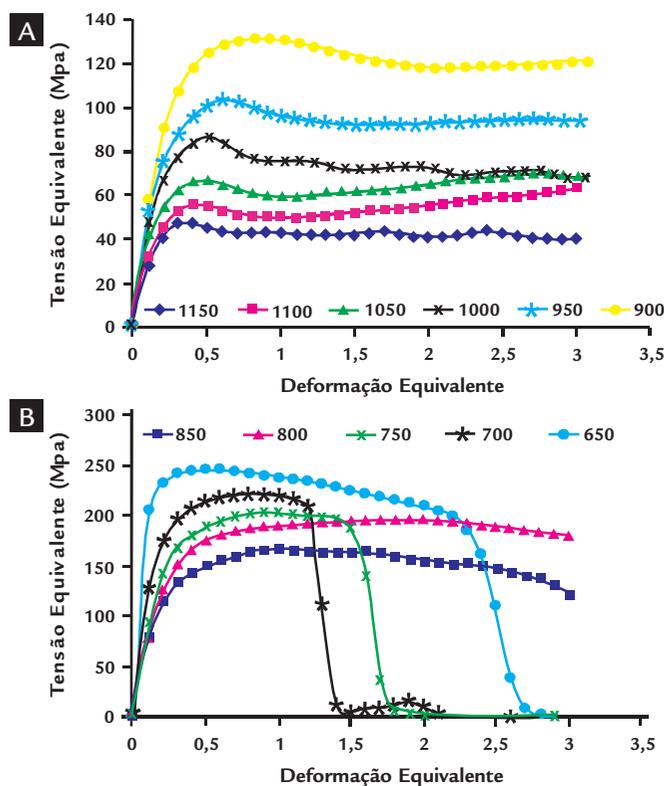


Figura 3 (A) Influência da temperatura sobre a tensão equivalente para os ensaios conduzidos isotermicamente e $T \geq 900^\circ\text{C}$. (B) para os ensaios conduzidos isotermicamente e $T \leq 850^\circ\text{C}$.

T (°C)	σ_p	ϵ_p	σ_{ss}
650	-	-	246,36
700	-	-	218,98
750	-	-	201,79
800	-	-	195,88
850	-	-	162,94
900	131,08	0,82	118,80
950	101,75	0,71	92,18
1000	86,03	0,52	72,99
1050	66,70	0,51	63,43
1100	55,35	0,51	54,51
1150	48,01	0,40	42,10

Tabela 2 Valores de tensão e deformação de pico e tensão do regime estacionário.

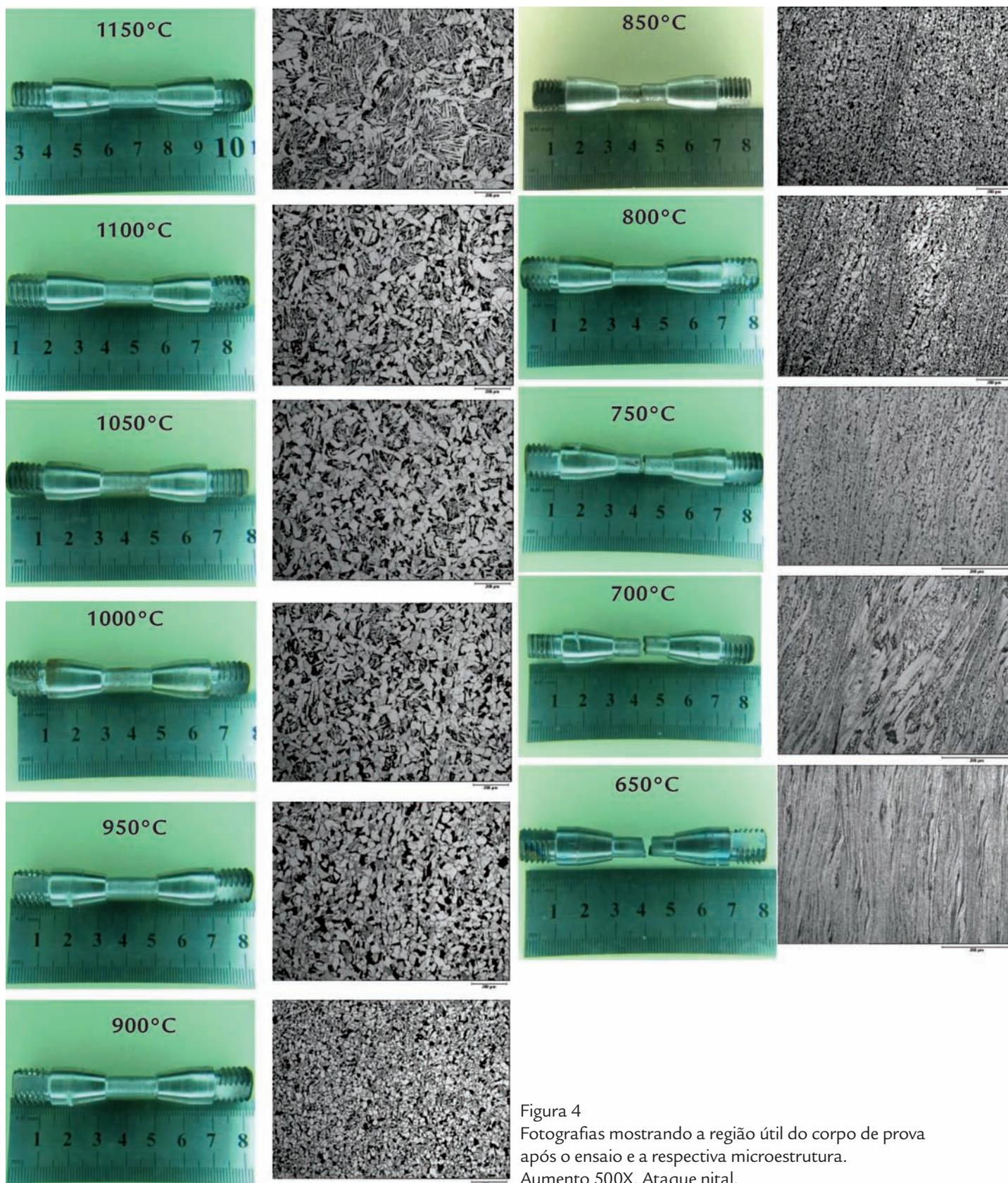


Figura 4
Fotografias mostrando a região útil do corpo de prova após o ensaio e a respectiva microestrutura. Aumento 500X. Ataque nital.

Figura 2. De uma maneira geral, o que ocorre é o seguinte:

- Em temperaturas acima de T_{nr} , o principal mecanismo de amaciamento é a recristalização estática da austenita, entre os passes, seguida de crescimento de grão, cujo tamanho final será função da temperatura. A

transformação austenita-ferrita, a partir desses grãos recristalizados, produzirá grãos ferríticos de tamanho entre 5 e 8 ASTM.

- Em temperaturas entre T_{nr} e A_{r3} , não haverá recristalização da austenita, causando o acúmulo de encruamento entre passes, resultando em austenita

muito deformada em forma de panquecas. Os grãos ferríticos formados, a partir da austenita deformada, serão muito finos, da ordem de 12 ASTM,

- Deformações, em temperaturas abaixo de A_{r3} , resultarão em grãos ferríticos encruados, que poderão apenas recuperar-se.

4. Conclusão

- As temperaturas críticas levantadas são bem próximas das calculadas, utilizando-se as equações disponíveis na literatura.
- O mecanismo de amaciamento varia de acordo com a temperatura, sendo a de recristalização dinâmica acima de 900°C e a de recuperação dinâmica a partir de 850°C.
- O aspecto gráfico das curvas geradas pelos ensaios isotérmicos mostra uma similaridade com outros estudos realizados, para diversos aços, através de ensaio de torção a quente.
- Verificou-se um refinamento do grão à medida que a temperatura de apli-

cação da deformação decresce. Notou-se que o empanqueamento dos grãos, devido à deformação, é mais difícil de ser observado em temperaturas superiores a 900°C, em razão da recristalização dos grãos.

5. Referências bibliográficas

- FIELDS, D. S., BACKOFEN, W. A. Determination of strain hardening characteristics by torsion testing. *Amer. Soc. Test. Met.*, 57, p.1259-1272, 1957.
- GEITTENS, A. R. *Análise do comportamento mecânico de um aço carbono processado na região intercrítica*. São Paulo: UFSCAR, 2001.
- JORGE Jr, A. M., BALANCIN, O. Ensaio de torção: Um método para o estudo da trabalhabilidade a quente dos materiais metálicos. *REM- Revista Escola de Minas*, Ouro Preto, v. 46, n. 1/3, p. 128-135, jan-set 1993.
- JORGE Jr, A. M., BALANCIN, O., REGONE, W. Effects of competing hardening and softening mechanics on the flow stress curve modeling of ultra-low carbon steel at high temperature. *Journal of Materials Processing Technology*, v.142, p.415-421, mar. 2003.
- MACCAGNO, T. M., JONAS, J. J., YUE, S., MACCRADY, B. J., SLOBODIAN, R., DEEKS, D. Determination of recrystallization stop temperature from rolling mill logs and comparison with laboratory simulation results. *ISIJ International*, v. 34, n.11, p. 917-922, jul. 1994.
- REGONE, W. *Simulação da laminação a quente de um aço livre de intersticiais (IF) através de ensaio de torção*. São Paulo: UFSCAR, 2001.
- SEMIATIN, S. L., LAHOTI, G., JONAS, J. J. Application of the torsion test to determine workability. In: ASM, editor. *Metals Handbook: Mechanical Testing*, 8, 9th ed., OHIO: ASM, 1985. p. 154-184.

Artigo recebido em 12 de outubro de 2011. Aprovado em 19 de março de 2013.