

ANÁLISE DA RECRISTALIZAÇÃO DINÂMICA DO AÇO ESTRUTURAL MÉDIO CARBONO SAE 4140 ATRÁSE DE ENSAIOS ISOTÉRMICOS DE TORÇÃO A QUENTE¹

Rafael Agrizzi de Souza²
Armando Marques³
Mario Roberto Bellini Tasca⁴
Luciana Nogueira⁵
Marcelo Lucas Pereira Machado⁶

Resumo

A necessidade de redução de custos operacionais e da melhoria das propriedades mecânicas do produto laminado, mostram a importância do estudo e controle dos fenômenos metalúrgicos que ocorrem durante o processo de conformação. Este estudo utilizou amostras do aço estrutural SAE 4140 que foram submetidas a ensaios termomecânicos na máquina de torção a quente do Instituto Federal de Educação do Espírito Santo (IFES). As amostras foram aquecidas até a temperatura de 1.200°C e mantidas nessa temperatura para completa homogeneização térmica. A seguir foram resfriadas a uma taxa média 2°C/s até a temperatura de deformação. Durante os ensaios variou-se a temperatura e a taxa de deformação aplicadas ao corpo de provas. O resultado deste estudo foi avaliação dos fenômenos metalúrgicos através do levantamento de curvas tensão-deformação e das deformações críticas necessárias para início da recristalização dinâmica.

Palavras-chave: Torção a quente; Recristalização; SAE 4140; Deformação crítica.

ANALYSIS OF DYNAMIC RECRYSTALLIZATION OF MEDIUM CARBON STEEL SAE 4140 BY ISOTHERMAL HOT TORSION TESTS

Abstract

The requirement to reduce operational costs and improving the mechanical properties of the hot rolling product, shows the importance of the control and study of metallurgical phenomena that occur during the forming process. This study has used samples of structural steel SAE 4140 have been subjected to thermomechanical testing machine in hot torsion of the Instituto Federal de Educação do Espírito Santo (IFES). The samples have been heated to a temperature of 1,200°C and maintained at this temperature to complete homogenization temperature. The following have been cooled at an average 2°C/s until the temperature of deformation. During the tests the temperature and the strain rate have been modified in each test sample. The result of this study was evaluation of metallurgical phenomena through the analysis of stress-strain curves and the critical strain required for initiation of dynamic recrystallization.

Key words: Hot torsion; Recrystallization; SAE 4140; Critical deformation.

¹ Contribuição técnica ao 67º Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Engenheiro Mecânico. Aluno do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais do Instituto Federal de Educação do Espírito Santo-IFES, Vitória-ES.

³ Engenheiro Mecânico. Prof. da Coordenadoria do Curso Técnico em Mecânica-IFES, Vitória-ES

⁴ Engenheiro de Materiais. Aluno do Progr. de Pós-Graduação em Eng. Metal. e de Materiais do IFES, Vitória-ES.

⁵ Aluna de Graduação em Engenharia Metalúrgica do IFES.

⁶ Professor Doutor e Titular do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – IFES.

1 INTRODUÇÃO

O processo usual de produção onde a matéria-prima é o aço envolve trabalho a quente, normalmente, na região austenítica onde o resfriamento determina a microestrutura e as propriedades finais do produto. Aços trabalhados a quente recebem extensivos estudos a décadas e esses resultados sendo aplicados no processo de fabricação de forma a reduzir custos e obter um produto com as propriedades finais desejadas.⁽¹⁾

O modelamento do comportamento plástico dos aços trabalhados em altas temperaturas é essencial para melhorar o processamento industrial desses produtos. Entretanto, esse não é uma tarefa fácil, visto que a microestrutura do material evolui ao longo do tempo devido aos mecanismos de endurecimento e amaciamento como o encruamento, recuperação e recristalização. Dessa forma, o formato das curvas tensão-deformação são dependes da interação entres esses fenômenos metalúrgicos.⁽²⁾

O ensaio de torção favorece a análise do material sob deformação visto que os corpos de prova podem sofrer grandes deformações e permite várias etapas de deformação sem que o teste seja interrompido. E quando comparado ao ensaio de compressão a quente, que também é utilizado para avaliação de fenômenos metalúrgicos, não sofre os efeitos do atrito que provoca deformação heterogênea.⁽³⁾

O aço AISI/SAE 4140 é utilizado em aplicações que requerem combinação de moderada temperabilidade, boa resistência mecânica e tenacidade, mas em serviços de moderada severidade. Apresenta média usinabilidade, baixa soldabilidade e temperabilidade relativamente alta.⁽⁴⁾

Neste estudo foi analisado o fenômeno metalúrgico da recristalização dinâmica associado à torção em altas temperaturas do aço estrutural SAE 4140. Foram analisados os valores de tensão de pico e as deformações críticas para início da recristalização dinâmica, que estão de acordo com a literatura.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para analisar o comportamento sob deformação a quente dos metais, utilizou-se um aço estrutural comercial do tipo SAE 4140, no qual a composição química está apresentada na Tabela 1. A análise química foi realizada utilizando um espectrômetro de Emissão Ótica da Oxford Instruments, modelo *Foundry-Master Pro* do laboratório de redução do IFES.

Tabela 1. Composição química do aço SAE 4140 (% em peso)

C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo
0,434	0,855	0,016	0,022	0,309	0,871	0,221

2.1 Preparação do Material

Os corpos de prova do aço estrutural foram usinados, a partir de barras cilíndricas de 19,05 mm, com diâmetro útil de 5 mm e comprimento útil de 20 mm (Figura 1). O dimensional dos corpos de prova, diâmetro e comprimento úteis, foram projetados para atender a máxima capacidade de torque do equipamento de torção e obter maiores taxas de deformações.

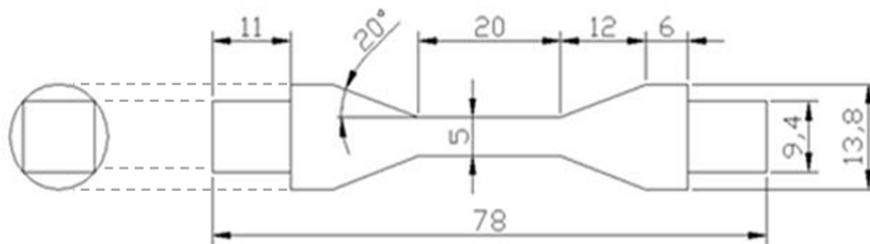


Figura 1. Desenho esquemático do corpo de prova.

2.2 Equipamento

Os ensaios de torção a quente foram realizados utilizando uma máquina horizontal de torção a quente Instron, modelo 55 MT do laboratório de conformação mecânica do IFES (Figura 2). O equipamento é conectado a um microcomputador que, via *software* a permite aquisição dos dados e controle do processo de torção, fornecendo resultados na forma de gráficos torque *versus* ângulo de rotação. A velocidade de rotação do equipamento varia de 0 rpm a 120 rpm e os esforços são medidos por uma célula de carga que possui capacidade máxima de carga de 22 Nm.

Na Figura 2b, o eixo torsor da máquina de torção é composto do lado esquerdo pelos dispositivos responsáveis pelo movimento de rotação, sistema de freio e leitura do ângulo de rotação e do lado esquerdo está localizado a célula de carga que é responsável pela leitura do torque durante os ensaios.

Os corpos de prova foram aquecidos e resfriados utilizando um forno de indução Inductotherm (Figura 2a), com potência máxima de 10 KW e capacidade de aquecimento de até 1.600 graus Celsius. Para o controle da temperatura foi utilizado um termopar do tipo K (Cromel-Alumel) que durante os ensaios ficou inserido em um furo no corpo de prova localizado logo após a seção útil.

Para proteção do corpo de prova contra a corrosão (atmosfera sem O₂), adaptou-se na máquina um tubo de quartzo (Figura 2b), que passa pelo eixo longitudinal (garras e corpo de prova), no qual circula um fluxo contínuo de gás argônio. O tubo de quartzo também permite a injeção de gás CO₂, responsável pelo tratamento de têmpera dos corpos de prova sem a necessidade de retirá-los da máquina de torção.

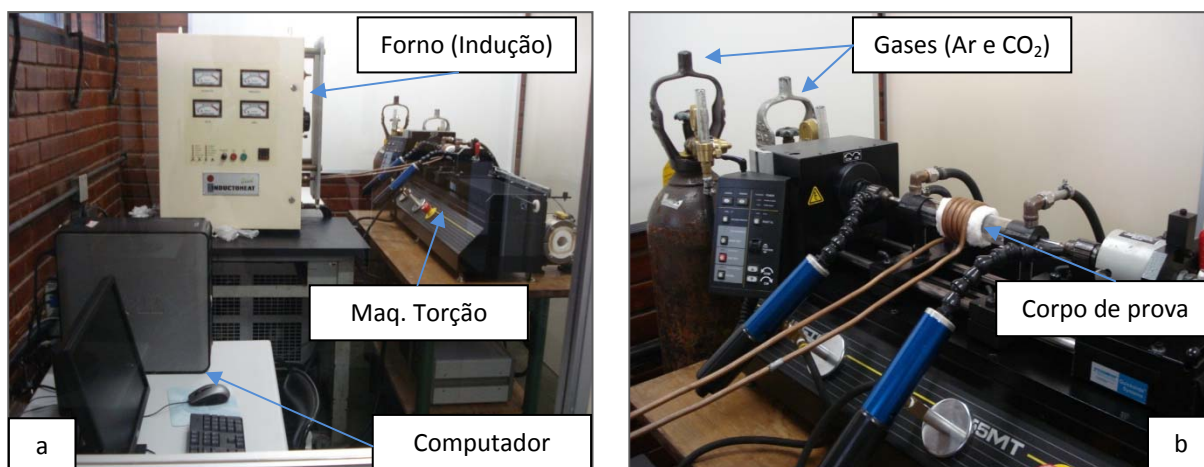


Figura 2. Visão geral da máquina de torção e forno de indução.

2.3 Curvas Tensão Equivalente X Deformação Equivalente

O resultado obtidos dos ensaios de torção a quente são na forma de curvas (torque *versus* ângulo de rotação). Assim, os valores de tensões equivalentes (σ_{eq}) e deformações equivalentes (ϵ_{eq}) são determinados a partir das Equações 1 e 2.⁽⁵⁻⁷⁾

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

$$\epsilon_{eq} = \frac{R\theta}{\sqrt{3}L} \quad (2)$$

Embora os valores de m e n variem com a deformação, como simplificação foi admitido m = 0,17 e n = 0,13, logo m+n = 0,3, que são os valores utilizados na literatura.⁽⁶⁾

2.4 Ensaios de Torção Isotérmicos

Os ensaios isotérmicos de torção a quente permitem a obtenção de dados do comportamento mecânico do material e permitem determinar valores da tensão de pico e da deformação crítica para início do fenômeno de recristalização dinâmica. A Figura 3 mostra o esquema do ciclo termomecânico utilizado nos ensaios. Os corpos de prova foram aquecidos até 1.200°C ($T_{encharque}$) e mantidos nessa temperatura por 3 minutos. Então, as amostras foram resfriadas a uma taxa média de 2°C/s até a temperatura de torção ($T_{torção}$) e mantidas nessa temperatura durante 1 minuto para homogeneização térmica e em seguida foi iniciado o ensaio de torção.

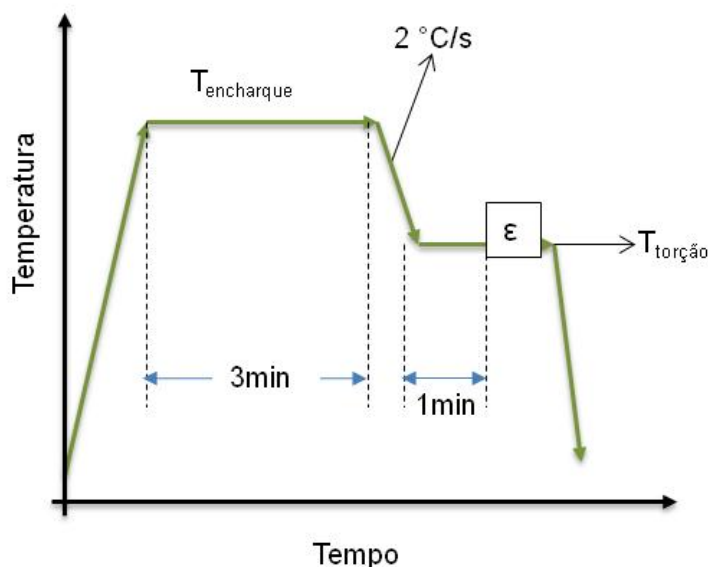


Figura 3. Esquema do ciclo termomecânico utilizado nos ensaios isotérmicos de torção a quente.

As taxas de deformações utilizadas nos ensaios foram de $0,2s^{-1}$ e $0,5s^{-1}$ e as temperaturas foram de 1.150°C e 1.050°C.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos ensaios de torção a quente são mostrados na forma de curvas tensão equivalente *versus* deformação equivalente (Figura 4), para o aço estrutural SAE 4140. Os efeitos da temperatura e taxa de deformação nas curvas de escoamento plástico foram significativos em todas as condições de ensaio.

Na Figura 4 observou-se o fenômeno metalúrgico de recristalização dinâmica em todos os ensaios de torção a quente realizados. A ocorrência da recristalização dinâmica está associada à geração de um grande número de defeitos durante a deformação e da aniquilação desses defeitos por meio da migração dos contornos de grão.⁽⁷⁾

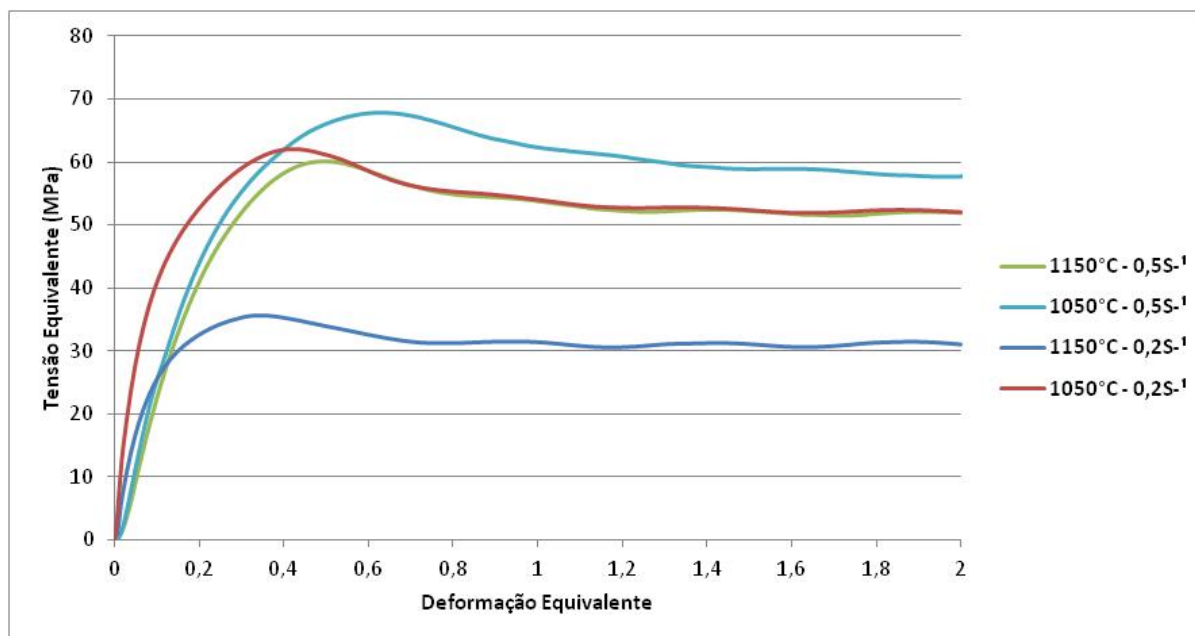


Figura 4. Curvas tensão-deformação para o aço SAE 4140 nas temperaturas de 1.150°C e 1.050°C e taxas de deformações de 0,2s⁻¹ e 0,5s⁻¹.

O efeito da temperatura nas curvas de escoamento plástico pode ser observado nos valores das tensões de pico (σ_p) e deformações de críticas (ϵ_c) para início da recristalização dinâmica (Figura 5). É observado que para temperaturas mais elevadas são obtidos menores valores de σ_p e ϵ_c . Para as curvas de 1.150°C e 1.050°C e taxa de deformação de 0,2s⁻¹ os valores de σ_p e ϵ_c são 35 MPa e 0,24; 62 MPa e 0,3; respectivamente. Já nas curvas de 1.150°C e 1.050°C e taxa de deformação de 0,5 s⁻¹ os valores de σ_p e ϵ_c são 60 MPa e 0,35; 67 MPa e 0,46; respectivamente.

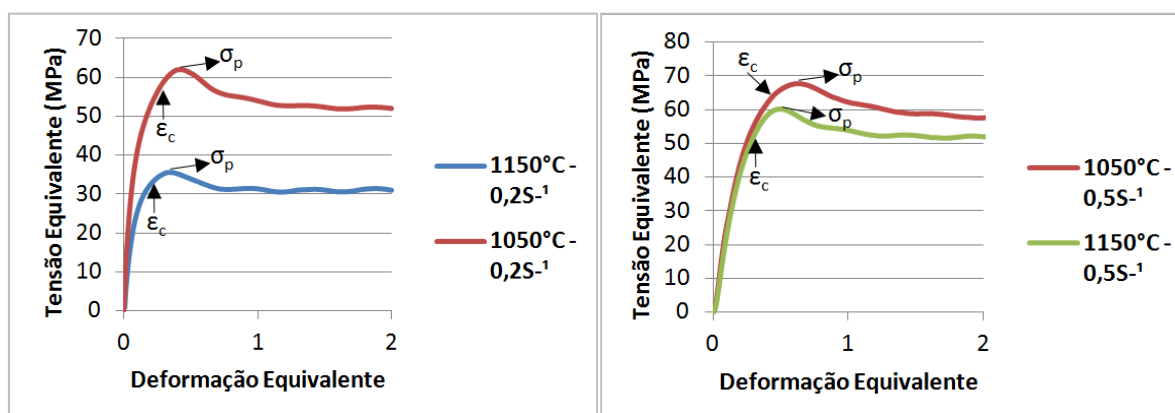


Figura 5. Efeito da temperatura nas curvas tensão-deformação do aço SAE 4140.

A Figura 6 mostra o comportamento das curvas tensão-deformação quando é mantida constante a temperatura de deformação e varia-se a taxa de deformação. O

aumento da taxa de deformação provoca aumento da σ_p e aumento da ϵ_c necessária para início da recristalização dinâmica.

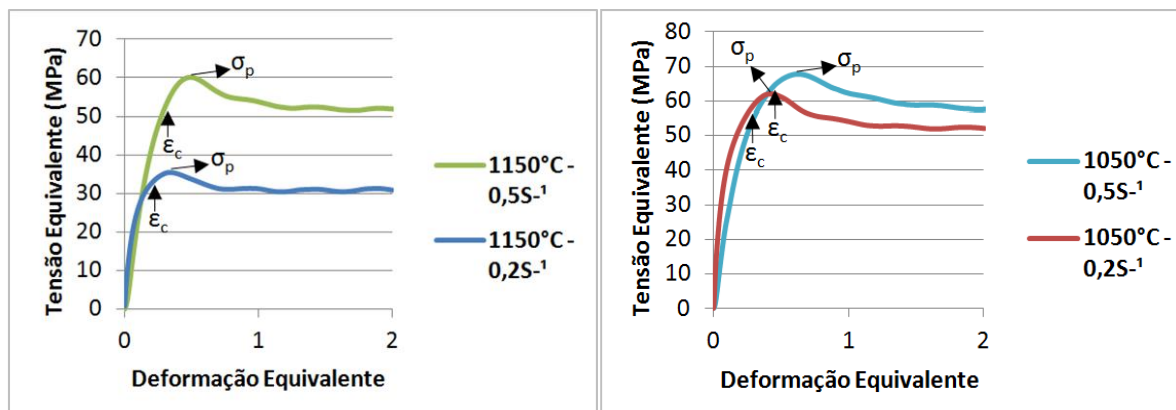


Figura 6. Efeito da taxa de deformação nas curvas tensão-deformação do aço SAE 4140.

A deformação crítica (ϵ_c) foi estimada utilizando o método de Mecking e Kocks⁽⁷⁻⁹⁾. Nessa aproximação o valor da taxa de encruamento foi determinado derivando-se cada curva tensão-deformação da Figura 4. As curvas da Figura 7 consistem em dois estágios: no primeiro, há decréscimo da taxa de encruamento com o aumento da tensão até ser atingida a ϵ_c para o início da recristalização dinâmica; no segundo estágio, há um maior decréscimo da taxa de encruamento da tensão crítica (σ_c) até a tensão de pico (σ_p), ponto no qual a taxa de encruamento é igual a zero.

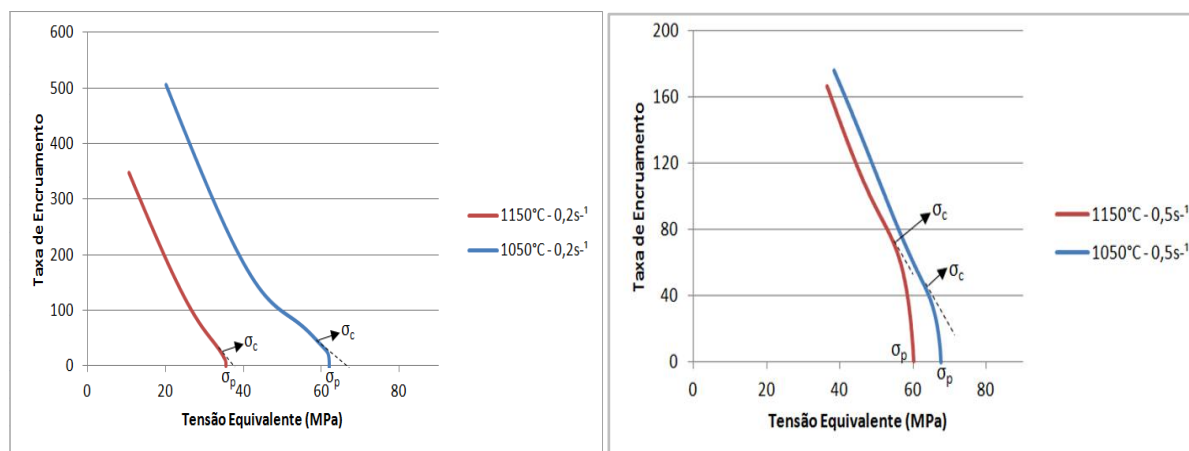


Figura 7. Taxa de encruamento em função da tensão equivalente.

A partir dos valores de σ_c obtidos da Figura 7, para taxa de deformação de $0,2 \text{ s}^{-1}$, 34 MPa (1.150°C) e 59 MPa (1.050°C) e para a taxa de deformação de $0,5 \text{ s}^{-1}$, 55 MPa (1.150°C) e 64 MPa (1.050°C), foi possível determinar os valores das ϵ_c para cada temperatura e taxa de deformação nas respectivas curvas da Figura 4. As ϵ_c estão representadas nas curvas estratificadas das Figuras 5 e 6.

Da mesma forma, a partir dos valores de σ_p obtidos das curvas da Figura 7, 36 MPa (1.150°C) e 62 MPa (1.050°C) para taxa de deformação de $0,2 \text{ s}^{-1}$, e, 60 MPa (1.150°C) e 67 MPa (1.050°C) para taxa de deformação de $0,5 \text{ s}^{-1}$, foi possível determinar os valores de ϵ_p , 0,35; 0,43; 0,49 e 0,64, respectivamente.

A relação entre ϵ_c/ϵ_p foi de 0,708 (1.150°C) e de 0,713 (1.050°C) na taxa de deformação de $0,2 \text{ s}^{-1}$ e de 0,711 (1.150°C) e de 0,722 (1.050°C) na taxa de

deformação de $0,5s^{-1}$. Esses resultados estão de acordo com os resultados obtidos na literatura, para aços carbono deformados a quente a relação entre $\varepsilon_c/\varepsilon_p$ é de 0,83 e pode assumir valores menores de até 0,5 para aços ao nióbio.^(7,10)

4 CONCLUSÃO

Neste estudo, as características termomecânicas do aço SAE 4140 foram obtidas para diferentes temperaturas de conformação e taxa de deformação durante os ensaios de torção a quente.

As curvas tensão-deformação equivalentes mostram que o aumento da temperatura de deformação diminui a ε_c para início da recristalização dinâmica e diminuem também a σ_p . O aumento da taxa de deformação provoca aumento da ε_c para início da recristalização e aumento da σ_p .

A relação média $\varepsilon_c/\varepsilon_p$ ficou em torno de 0,71, estando de acordo com a literatura.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao IFES pela disponibilização dos laboratórios. R.A.S agradece a CAPES pela bolsa de Pós-Graduação.

REFERÊNCIAS

- 1 AKBARI, G. H.; SELLARS, C. M.; WHITEMAN, J. A. MICROSTRUCTURAL DEVELOPMENT DURING WARM ROLLING OF AN IF STEEL. *Acta Metallurgica*, Great Britain, v. 45, p. 5047-5058, May 1997.
- 2 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. *Jornal of Materials Processing Technology*, v. 142, p. 415-421, mar. 2003.
- 3 WONG, S. F.; HODGSON, P. D.; THOMSON, P. F. Comparison of torsion and plane-strain compression for predicting mean yield strength in single-and multiple-pass flat rolling using ead to model hot steel. *Jornal of Materials Processing Technology*, v. 53, p. 601-616, 1995.
- 4 PHILIPS, T. V.; MCCAFFREY, T. J. Ultrahigh-strength steels. In: *ASM HANDBOOK Properties and Selection: Irons Steels and High Performance Alloys*. [S.l.]: ASM International, v. 1, 1993. p. 1123.
- 5 FIELDS, D. S.; BACKOFEN, W. A. Determination of Strain Hardening Characteristics by Torsion Testing. *Proc. ASTM*, v. 57, p. 1259, 1957
- 6 SICILIANO JR., F. Mathematical Modeling of the Hot Strip Rolling of Nb Microalloyed Steels, Montreal, Canada: Ph.D Thesis, McGill University, p. 50, 1999.
- 7 PADILHA, A. F.; SICILIANO JR., F. Encruamento, Recristalização, Crescimento de Grão e Textura. 3^a. ed. São Paulo: ABM, 2005.
- 8 MECKING, H.; KOCKS, U. F. Kinetics of flow and strain-hardening. *Acta Metallurgica*, v. 29, p. 1865-1875, nov. 1981.
- 9 ZAHIRI, S. H.; HODGSON, P. D. The static, dynamic and metadynamic recrystallisation of a medium carbon steel. *Materials Science and Technology*, v. 20, p. 458-464, 2004.
- 10 SICILIANO JR., F.; JONAS, J. J. Mathematical Modeling of the Hot Strip Rolling of Microalloyed Nb, Multiply-Alloyed Cr-Mo, and Plain C-Mn Steels. *METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A*, v. 31A, p. 511-530, fev. 2000.