



AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO AÇO ESTRUTURAL SAE 4340 ATRAVÉS DE ENSAIOS ISOTÉRMICOS DE TORÇÃO A QUENTE¹

Rafael Agrizzi de Souza²

Armando Marques³

Wandercleiton da Silva Cardoso⁴

Marcelo Lucas Pereira Machado⁵

Resumo

Para redução dos custos operacionais e a melhoria das propriedades mecânicas do material produzido por laminação a quente é necessário o controle dos fenômenos metalúrgicos e microestruturais que ocorrem durante o processo de conformação. Um método experimental capaz de simular as condições de laminação é o ensaio de torção a quente, que é um ensaio eficiente e, relativamente, de baixo custo para estudo dos processos termomecânicos da laminação. Este estudo utilizou amostras do aço estrutural SAE 4340 que foram submetidas a ensaios termomecânicos na máquina de torção a quente do IFES. As amostras foram aquecidas até a temperatura de 1200 °C e mantidas nessa temperatura (encharque) para completa homogeneização. A seguir foram resfriadas a uma taxa média 2°C/s até a temperatura de deformação. Os ensaios foram realizados com taxa de deformação constante de 0,2 s⁻¹ e variou-se a temperatura de deformação. O resultado deste estudo foi o levantamento das curvas de escoamento plástico para diferentes temperaturas de deformação. Assim, foi possível avaliar a influência dos fenômenos metalúrgicos que ocorrem durante o processo de deformação a quente.

Palavras-chave: Torção a quente; Recristalização; Recuperação; SAE 4340.

EVALUATION OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF STRUCTURAL STEEL SAE 4340 BY ISOTHERMAL HOT TORSION TESTS

Abstract

To reduce operating costs and improving the mechanical properties of the material produced by hot rolling is necessary to control the microstructure and metallurgical phenomena occurring during the forming process. An experimental method capable of simulating the conditions of hot rolling is the hot torsion test, a test that is efficient and relatively inexpensive to study the processes of thermomechanical rolling. This study used samples of structural steel SAE 4340 were submitted to tests in hot torsion machine of the IFES. The samples were then heated to a temperature of 1200°C and maintained at this temperature (soaking) to complete homogenization. They were then cooled at an average rate 2°C/s until the temperature of deformation. The tests were performed with constant strain rate of 0.2s⁻¹ and varied the temperature of deformation. The result of this study obtained stress-strain curves for different temperatures. Thus, It was possible to evaluate the effects of metallurgical phenomena occurring during hot deformation.

Key words: Hot torsion; Recrystallization; Recovery; SAE 4340.

¹ Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.

² Engenheiro Mecânico. Aluno de Mestrado 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. Professor da Coordenadoria do Curso Técnico em Mecânica. Aluno do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais do IFES, Vitória-ES

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

⁵ 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 SAE 4340 é caracterizado como um aço para beneficiamento apresentando alta temperabilidade e a capacidade de alcançar elevada resistência em seções grandes. No estado de temperado e revenido pode alcançar limite de resistência de até 1000MPa. Suas principais aplicações são virabrequins, engrenagens, bielas e eixos sujeitos a grandes esforços.⁽⁴⁾

Neste estudo foram analisados os fenômenos metalúrgicos associados à torção em altas temperaturas do aço estrutural SAE 4340, no qual se observou recristalização dinâmica nas temperaturas de 1.000°C e 1.100°C e recuperação dinâmica na temperatura de 800°C, e as tensões de pico e críticas e as deformações críticas para inicia 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 4340, no qual a composição química está apresentada no Quadro 1. A análise química foi realizada utilizando um espectrômetro Oxford Instruments, modelo Foundry-Master Pro do laboratório de redução do IFES.

Quadro 1 – composição química do aço SAE 4340 (% em peso)

C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	Ni
0,4330	0,7100	0,0129	0,0181	0,2320	0,7310	0,2410	1,6500

2.1 Preparação do Material

Os corpos de prova do aço estrutural foram usinados, a partir de barras cilíndricas de 15,88 mm, com diâmetro útil de 5mm e comprimento útil de 20 mm, como representado na Figura 1. O dimensionamento dos corpos de prova, diâmetro e comprimento úteis, foram otimizados para atender a capacidade de máximo torque do equipamento de torção e obter maiores taxas de deformação.

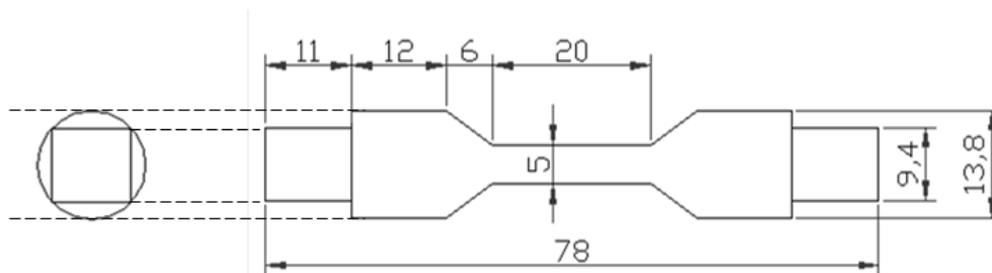


Figura 1 - Desenho esquemático do corpo de prova.

2.2 Equipamento

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

Na Figura 2c, 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 localizada a célula de carga que é responsável pela leitura do momento torsor durante os ensaios.

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

Para proteção do corpo de prova contra a corrosão, adaptou-se a máquina um tubo de quartzo (Figura 2c), 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.

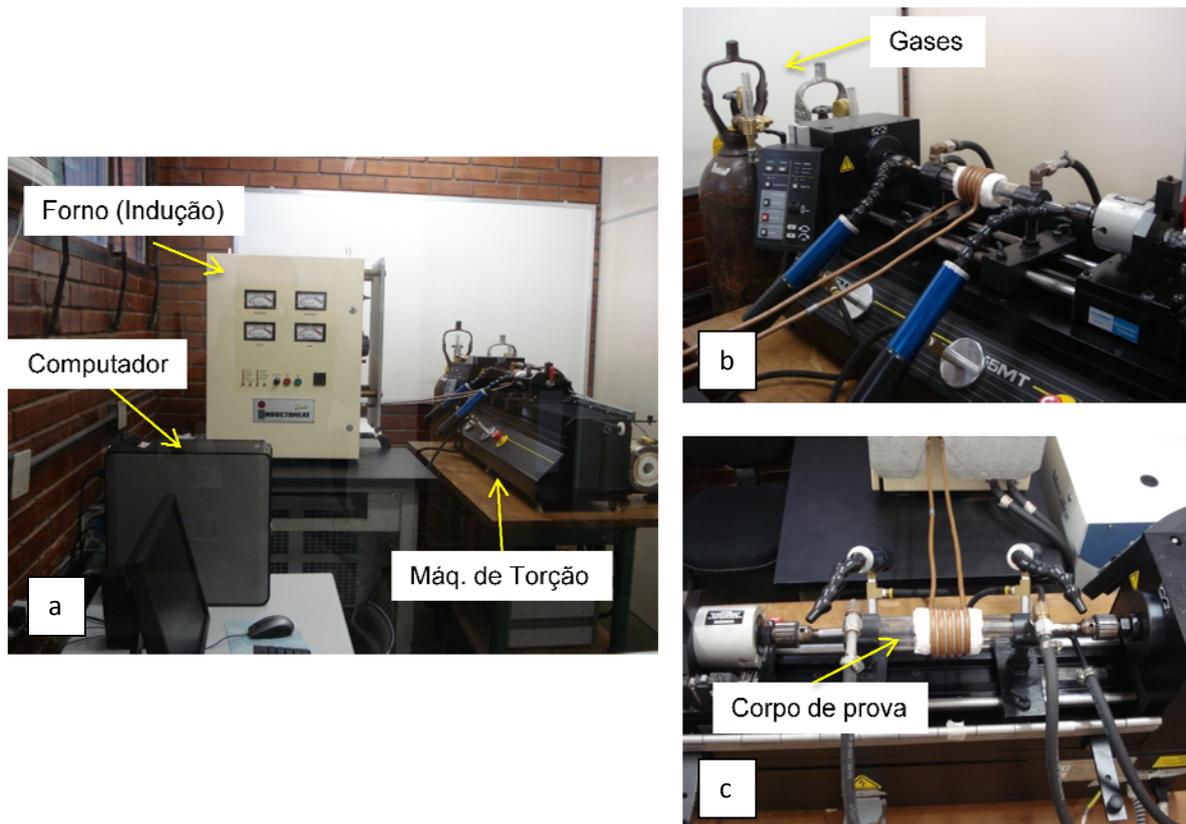


Figura 2 - Visão geral da máquina de torção e forno de indução.

2.3 Curvas Tensão Equivalente X Deformação Equivalente

Os ensaios mecânicos de torção a quente forneceram resultados na forma de curvas momento torsor x ângulo de rotação. Então, os valores de tensões equivalentes (σ_{eq}) e deformações equivalentes (ε_{eq}) são calculados a partir da Eq. 1 e Eq. 2.⁽⁵⁻⁷⁾

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

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

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

2.4 Ensaios de Torção Isotérmicos

A realização de ensaios de torção a quente isotérmico permite 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 e mantidos nessa temperatura por 5 minutos. Então, a amostra foi resfriada a uma taxa média de 2°C/s até a temperatura de torção e mantida nessa temperatura durante 1 minuto para homogeneização térmica.

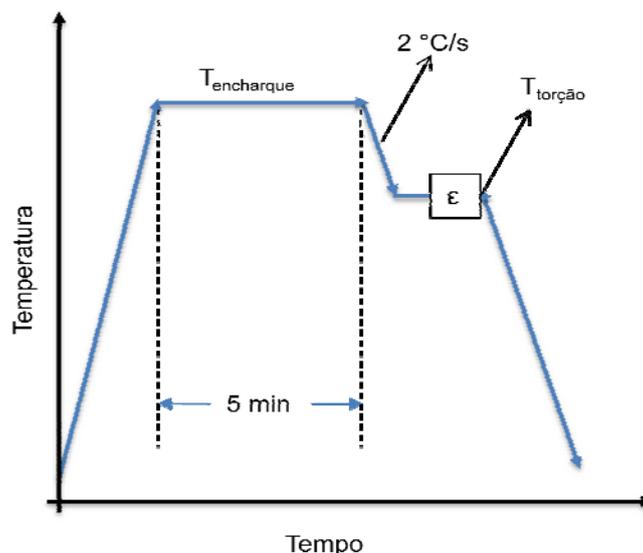


Figura 3 - Esquema do ciclo termomecânico utilizado nos ensaios isotérmicos de torção a quente.

A taxa de deformação utilizada no ensaio foi de $0,2 \text{ s}^{-1}$ e as temperaturas utilizadas nos ensaios foram de 1.100°C , 1.000°C e 800°C .

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos ensaios de torção a quente foram mostrados na forma de curvas tensão equivalente versus deformação equivalente (Figuras 4 e 5), para o aço estrutural SAE 4340. Os efeitos da temperatura e taxa de deformação nas curvas de escoamento plástico foram significantes em todas as condições de ensaios.

Na Figura 4 observou-se o fenômeno metalúrgico de recristalização dinâmica. A ocorrência da recristalização dinâmica está associada à geração de um grande número de defeitos durante a deformação e a aniquilação desses defeitos por meio da migração dos contornos de grão.⁽⁷⁾ O efeito da temperatura na curva de escoamento plástico pode ser observado nas tensões de pico (σ_p) e deformações de pico (ε_p) e que pode ser claramente visto que para temperaturas mais altas eram esperado menores valores de σ_p e ε_p . Na curva de 1.000°C a σ_p foi de $92,54 \text{ MPa}$ e na curva de 1.100°C a σ_p foi de $65,84 \text{ MPa}$

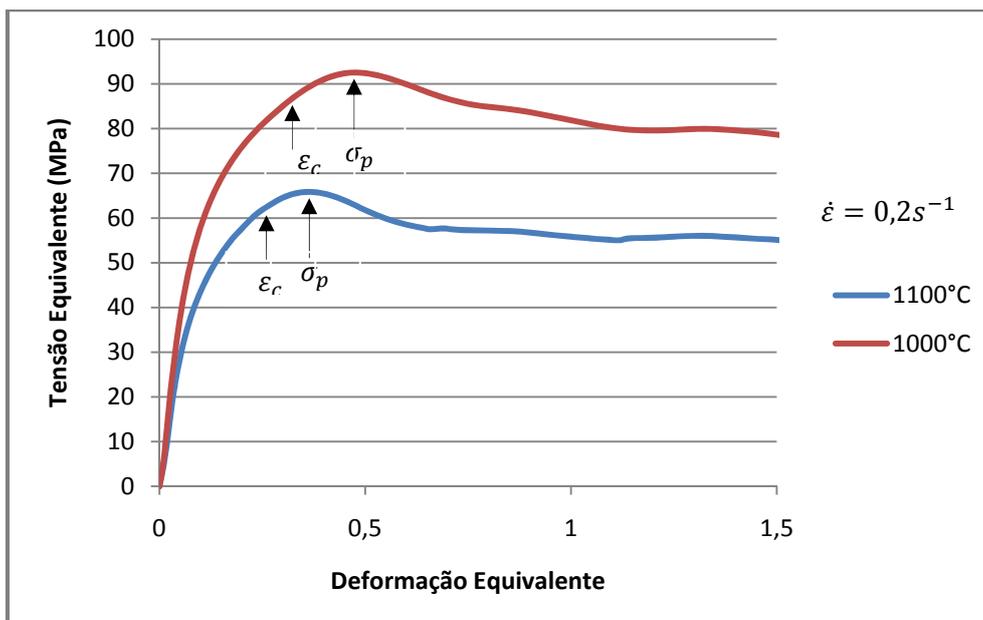


Figura 4 - Curvas tensão-deformação para o aço SAE 4340 nas temperaturas de 1.100°C e 1.000°C.

Na Figura 5 com o material sendo deformado na temperatura de 800°C o comportamento apresentado pelo material foi de recuperação dinâmica, na qual em um dado instante é atingido um ponto de estado estacionário (*steady state*, σ_{SS}), no qual a quantidade de defeitos gerados é compensada pela quantidade de defeitos aniquilados.⁽⁷⁾ E esse efeito aparece na curva tensão-deformação como uma estabilização da tensão enquanto o material está sendo deformado a quente. Como pode ser observado na Figura 5, a tensão máxima de 190,55 MPa é alcançada quando o material atinge o estado de σ_{SS} .

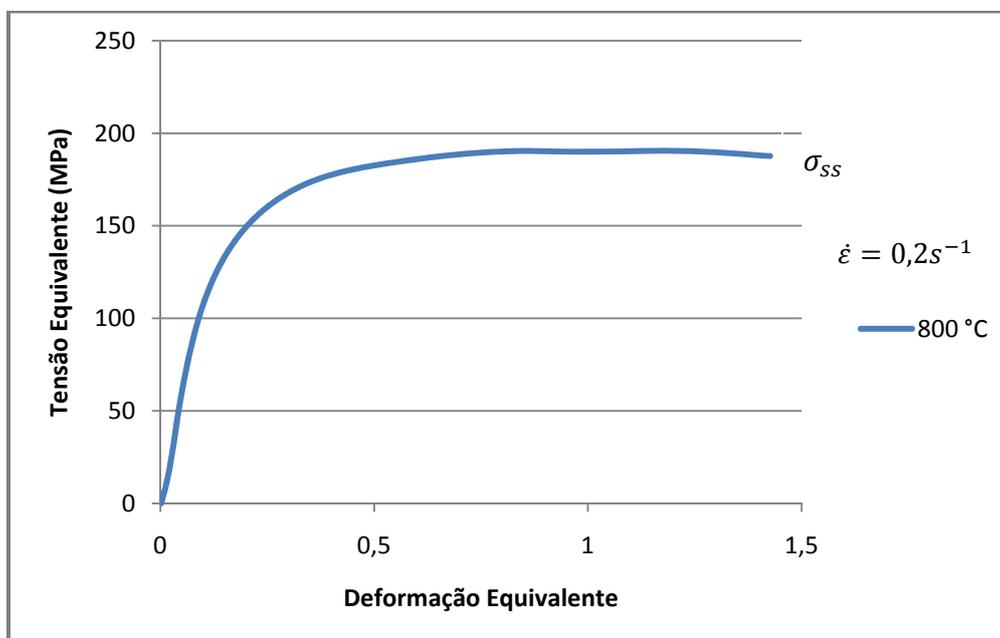


Figura 5 - Curva tensão-deformação para o aço SAE 4340 na temperatura de 800°C.

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 as curvas tensão-deformação, Figura 3. As curvas de Figura 6 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 σ_c até a σ_p , ponto no qual a taxa de encruamento é igual a zero.

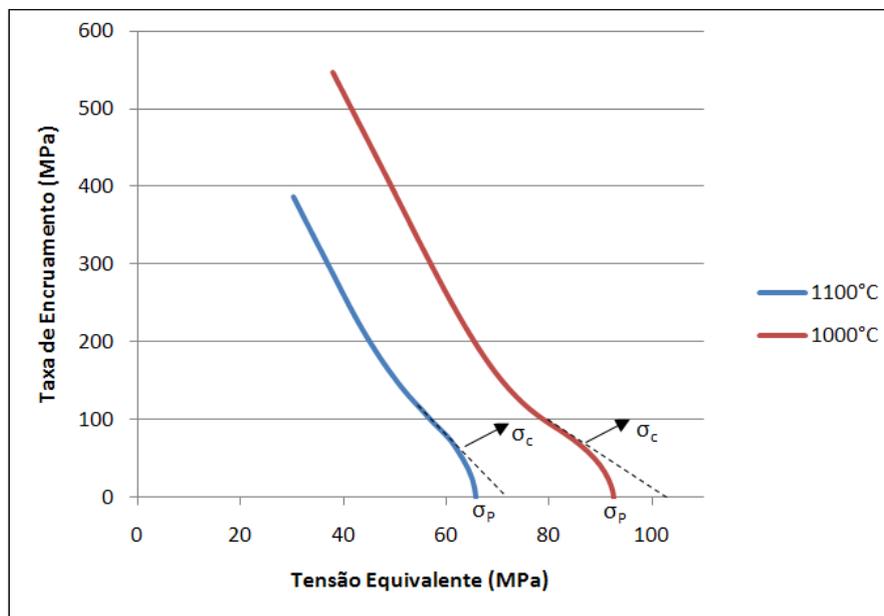


Figura 6 - Taxa de encruamento em função da tensão aplicada

Com os valores de σ_c , obtidos da Figura 6, 87,44 MPa e 62,23 MPa é possível determinar os valores das ϵ_c , na Figura 4, 0,33 e 0,25 para temperatura de 1.000°C e 1.100°C, respectivamente.

Da mesma forma, a partir dos valores de σ_p , 92,54 (1.000°C) e 65,84 MPa (1.100°C), é possível determinar os valores de ϵ_p , 0,47 e 0,35 nas temperaturas de 1.000°C e 1.100°C, respectivamente.

A relação entre ϵ_c/ϵ_p foi de 0,703 (1.000°C) e de 0,719 (1.100°C), esses resultados estão de acordo com os resultados obtidos na literatura. Para aços carbono deformados a quente a relação entre ϵ_c é $0,83\epsilon_p$ e podendo assumir valores menores de até $0,5\epsilon_p$ para aços ao nióbio.^(7,10)

4 CONCLUSÃO

Neste estudo, as características termomecânicas do aço SAE 4340 foram obtidas para diferentes temperaturas de conformação durante o ensaio de torção. As curvas tensão-deformação equivalentes mostram que para temperaturas mais elevadas, 1.000°C e 1.100°C, ocorreram o fenômeno metalúrgico de recristalização dinâmica e que para a temperatura de 800°C observou-se o mecanismo de recuperação dinâmica.

A diminuição da temperatura provoca aumento das tensões máximas atingidas durante os ensaios. E, para as temperaturas nas quais houve recristalização dinâmica, temperaturas menores aumentam a deformação crítica necessária para início da recristalização dinâmica.

A relação ϵ_c/ϵ_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. W.S.C agradece a FAPES pela bolsa de Pós-Graduação.

REFERENCIAS

- 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 AÇOS VILLARES. Manual de produtos para construção Mecânica: aços para beneficiamento. 2^a. ed., 1991.
- 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.