

PROCESSOS DE RESTAURAÇÃO ESTÁTICA DO COBRE DEFORMADO A QUENTE ATRAVÉS DE TORÇÃO MONOTÔNICA E CÍCLICA ¹

Ivete Peixoto Pinheiro ²

Ronaldo Barbosa ³

Paulo Roberto Cetlin ⁴

Resumo

O estudo da influência do caminho de deformação abordado neste trabalho envolve análise das curvas de fluxo e o comportamento do metal com relação aos processos de amaciamento estático. A deformação a quente do cobre foi realizada através de ensaios de torção monotônica (contínua) e cíclica com amplitude de deformação de 0,05. Os ensaios de torção foram realizados numa máquina servohidráulica MTS, com controle e aquisição de dados através do controlador TESTSTAR 2. As condições de ensaios utilizadas foram: temperatura de 400°C e taxa de deformação de 0,1s⁻¹. A análise do amaciamento foi realizada através de interrupções programadas dos ensaios de torção, com intervalos de tempo conhecidos, e seguidas de recarregamento nas mesmas condições anteriores. A análise da fração amaciada segue o princípio de que a tensão de escoamento em altas temperaturas é uma medida representativa da microestrutura do material. A tensão do estado estacionário da torção cíclica foi inferior à da condição monotônica. A cinética de amaciamento estático após os ensaios de torção monotônica foi extremamente rápida, uma vez que com 1s depois da interrupção do ensaio, já se observava amaciamento de 8,5%. Nos ensaios de torção cíclica observou-se a presença do efeito Bauschinger e a fração amaciada atingiu o máximo em torno de 21% (com 100s), tendo como único processo de amaciamento a recuperação estática.

Palavras-chave: Amaciamento estático; Caminho de deformação; Deformação cíclica; Torção.

STATIC RESTORATION PROCESSES IN HOT WORKED COPPER DEFORMED MONOTONICALLY AND CYCLICALLY

Abstract

The present paper presents an analysis of the effect of the strain path on the hot flow curves and on the static restoration processes of copper. Hot working was completed either through monotonic (continuous) torsion or cyclic (reversed) torsion, with a strain amplitude of 0,05. Testing was performed in a MTS servo-hydraulic MTS machine employing the TESTSTAR 2 controlling and data acquisition system. The tests were made at a temperature of 400°C and a strain rate of 0,1 s⁻¹. The analysis of the softening used the double hit technique, where the test is stopped for various periods of time, followed by reloading. The fractional softening reflects the principle that the flow stress at high temperatures corresponds to the prevailing microstructure. The steady state flow stress under cyclic processing was lower than the same stress for monotonic torsion. The static softening kinetics after monotonic torsion was very fast, leading to a softening of 8,5 % after just 1s. The Bauschinger effect was observed in the cyclic tests, and the fractional softening reached a maximum of about 21% (after 100s), as a consequence of the presence of only static recovery as the softening mechanism.

Key words: Static softening; Strain path; Cyclic straining; Torsion.

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

² Dra., Profa. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Mecânica, Belo Horizonte. ivetepinheiro@deii.cefetmg.br.

³ Dr., Prof. Adjunto do Departamento Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG, Belo Horizonte. rbarbosa@demet.ufmg.br.

⁴ Dr., Prof. Titular do Departamento Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG, Belo Horizonte. pzetlin@demet.ufmg.br.

1 INTRODUÇÃO

Vários trabalhos relatam o efeito de alterações no caminho de deformação na conformação a frio e a quente.⁽¹⁻³⁾ Estes trabalhos abordam o fenômeno através da análise das curvas de escoamento bem como através dos processos de recristalização estática subsequentes à deformação a frio.⁽⁴⁾

O caminho de deformação tem grande influência na cinética de recristalização; além disso, já foi demonstrado através da calorimetria que a energia armazenada durante a deformação é reduzida com carregamento reverso.⁽⁵⁾

Lindh et al.⁽⁴⁾ concluíram que a deformação redundante (diferença entre deformação total e aparente) pode influenciar o comportamento do metal durante o recozimento posterior, afetando a cinética de recristalização, bem como o tamanho de grão. Por deformação aparente entende-se a deformação calculada através das dimensões finais e iniciais do corpo de prova. Nos trabalhos de Lindh⁽⁴⁾ a deformação redundante foi obtida através de um modelo simplificado de tração e compressão. Para efeito comparativo, realizaram-se em alguns corpos de prova apenas ensaios de tração, onde se determinou a temperatura de recristalização. Essa decresceu monotonicamente com o aumento da deformação total. Já para os corpos de prova submetidos à tração seguida de compressão, a temperatura de recristalização foi maior comparada aos ensaios apenas de tração (considerando a mesma deformação total). Esses autores concluíram que a deformação redundante apresenta 65% de eficiência em relação à deformação monotônica. Em um gráfico de temperatura de recristalização x tensão de escoamento foi verificado que, tanto para os testes de tração quanto para os testes de tração/compressão, obtém-se uma relação linear. Concluíram que a densidade de discordâncias controla, por um lado, o nível da tensão de escoamento e, por outro lado, a força motriz disponível para recristalização. Outra importante observação realizada foi que quanto maior o nível de deformação redundante, maior o tamanho de grão obtido após recristalização. Ocorreu portanto, um atraso na cinética de recristalização, sendo que a taxa de nucleação foi mais afetada que o crescimento dos grãos recristalizados.

Zhang^(6,7) analisou o comportamento da curva de fluxo e recristalização da liga de chumbo (com 0,059% de prata) com a mudança no caminho de deformação através de dois estágios de compressão plana. Os ensaios foram realizados a -25°C, numa câmara com dióxido de carbono, usando uma placa de teflon de 0,13mm de espessura como lubrificante e uma matriz em forma de canal que restringia o fluxo em uma direção. O segundo estágio foi realizado com uma rotação de 90° em relação ao primeiro, mantendo a mesma direção de fluxo restrito do primeiro estágio. Portanto, a direção onde ocorreu esforço de extensão no primeiro estágio ficou submetida ao esforço de compressão no segundo estágio. Após a reversão ocorreu uma queda acentuada na tensão de fluxo comparada à curva de compressão contínua, e um período transiente de baixo encruamento. A recristalização estática após o ensaio de compressão de duplo estágio, onde existia a deformação reversa, foi mais lenta que a do ensaio de compressão contínua.

Um teste adequado para medir a trabalhabilidade a quente de um material deve fornecer dados sobre a tensão de fluxo e a ductilidade dos materiais como função da deformação, taxa de deformação, temperatura e história do processamento. O teste de torção tem sido usado por mais de 30 anos como meio de medir a capacidade de trabalho a quente em metais e ligas metálicas, bem como sua evolução microestrutural.⁽⁸⁻¹²⁾ O cálculo da tensão equivalente na superfície do corpo de prova é realizado em função do torque e é dado pela equação 1.^(9,10)

$$\sigma_e = \frac{\sqrt{3}\Gamma}{2\pi.r^3}(3 + m + n) \quad (1)$$

onde: σ_e = tensão equivalente;

Γ = torque;

r = raio do corpo de prova;

m = coeficiente de sensibilidade da tensão à mudança na taxa de deformação angular;

n = coeficiente de sensibilidade da tensão à mudança na deformação angular.

O objetivo do presente trabalho foi analisar o efeito de mudanças no caminho de deformação através da análise das curvas de fluxo e o comportamento do cobre com relação aos processos de amaciamento estático após ensaios de torção monotônica e cíclica.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O material utilizado no trabalho foi o cobre comercialmente puro, cuja composição química é apresentada na Tabela 1 (percentuais em peso).

Tabela 1. Composição química do cobre comercialmente puro - percentuais em peso.

Sn	Pb	Fe	Zn	Ni	P	Al	Mg	Si	O
<0,10	0,010	0,010	0,0035	<0,002	0,026	<0,03	<0,001	0,024	0,017

Os corpos de prova (CPs) cilíndricos foram usinados com diâmetro de 6,35mm e comprimento útil de 15,0mm, guardando uma relação de comprimento/diâmetro de 2,36. Para homogeneizar a microestrutura e eliminar o encruamento superficial produzido durante a usinagem, os corpos de prova (CPs) foram inicialmente recozidos a 570°C durante 90 minutos, em vácuo de 1333×10^{-5} Pa (10^{-4} Torr). Os CPs foram medidos através de um projetor de perfil do tipo Mitutoyo modelo PJ-311A.

Os ensaios de torção foram realizados em uma máquina de torção MTS, servohidráulica, com controle e aquisição de dados através do controlador TESTSTAR 2. A máquina de torção possui um forno radiante com lâmpadas de tungstênio controlado por um microprocessador. O controle de temperatura foi realizado através de um termopar em contato com a parte útil do corpo de prova. Uma atmosfera de argônio foi usada durante a realização dos testes com o objetivo de evitar oxidação superficial do corpo de prova. O argônio era injetado em fluxo contínuo dentro do tubo de quartzo que envolvia a amostra.

Realizaram-se ensaios de torção monotônica ou contínua (um único sentido) e ensaios de torção cíclica (sentido horário, depois no sentido anti-horário e assim sucessivamente). Os dados obtidos de torque e deformação angular foram convertidos em tensão equivalente e deformação equivalente através do critério de von Mises, levando em consideração as dimensões de cada CP. Nos ensaios de torção cíclica as curvas de tensão equivalente x deformação equivalente foram obtidas através da deformação acumulada, que é a soma das deformações de cada ciclo em valor absoluto; foi usado também o valor absoluto da tensão.

Para examinar o comportamento do amaciamento durante os intervalos de conformação a quente, usou-se o método proposto nos trabalhos de Petkovic et al.⁽¹³⁾ que segue o princípio de que a tensão de escoamento em altas temperaturas é uma medida representativa da microestrutura do material. A amostra foi carregada com uma taxa de deformação constante até atingir uma deformação preestabelecida e então se retirou a carga por intervalos de tempo conhecidos. A amostra foi subsequente e recarregada à mesma taxa de deformação constante empregada anteriormente. A magnitude do limite de escoamento no recarregamento determina o grau de mudança estrutural que ocorreu durante o intervalo de descanso e pode consequentemente ser tomada como uma medida do progresso do amaciamento estático. O cálculo da fração amaciada (X) foi realizado através da equação 2:

$$X = \left[\frac{\sigma_f - \sigma_2}{\sigma_f - \sigma_1} \right] \times 100 \quad (2)$$

onde: X= fração amaciada;

σ_1 = limites de escoamento com 0,002 deformação plástica no primeiro passe de torção;

σ_2 = limites de escoamento com 0,002 deformação plástica no segundo passe de torção;

σ_f = tensão de fluxo no final do primeiro passe.

Antes de processar o ensaio de torção o corpo de prova foi aquecido a 570°C durante 30 minutos, seguido de resfriamento com uma taxa de 1°C/s até a temperatura de 400°C, permanecendo nessa temperatura durante 3 minutos, de tal forma a se conseguir homogeneização térmica através da seção do corpo de prova.

3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A melhor condição para análise dos ensaios de torção monotônica à temperatura de 400°C foi com taxa de deformação de 0,1s⁻¹. A curva encontrada na Figura 1(a) é característica dos processos que sofrem recristalização dinâmica na conformação a quente; observa-se um pico bem definido e baixo nível de oscilação de tensão após obtenção do estado estacionário. Foi possível determinar o ponto crítico de início da recristalização dinâmica ($\sigma_c = 152,68\text{MPa}$ e $\varepsilon_c = 0,68$) e o ponto de pico ($\sigma_p = 158,66\text{MPa}$ e $\varepsilon_p = 0,89$). Para uma deformação maior que 1, 2, a recristalização dinâmica encontrava-se completamente desenvolvida (regime estacionário).⁽¹⁴⁾

A Figura 1(b) mostra a curva de tensão equivalente x deformação equivalente para o ensaio de torção cíclica, usando a amplitude de 0,05. A curva obtida para o ensaio de torção monotônica na mesma condição de temperatura e taxa de deformação encontra-se em linha pontilhada, para facilitar a comparação com o ensaio de torção cíclica. Verifica-se que com a deformação cíclica, ocorreu o desaparecimento do pico de recristalização dinâmica. Pode-se observar também que ocorre uma diminuição na tensão de saturação da torção cíclica (σ_{ss}^c). Essa observação já havia sido realizada por Armstrong⁽¹⁵⁾ para a compressão multidirecional do alumínio 1100 à temperatura ambiente e nas curvas de fluxo de compressão múltipla do chumbo (T = -25°C e taxa de deformação = 2,65x10⁻³s⁻¹) no trabalho de Zhang.⁽⁶⁾

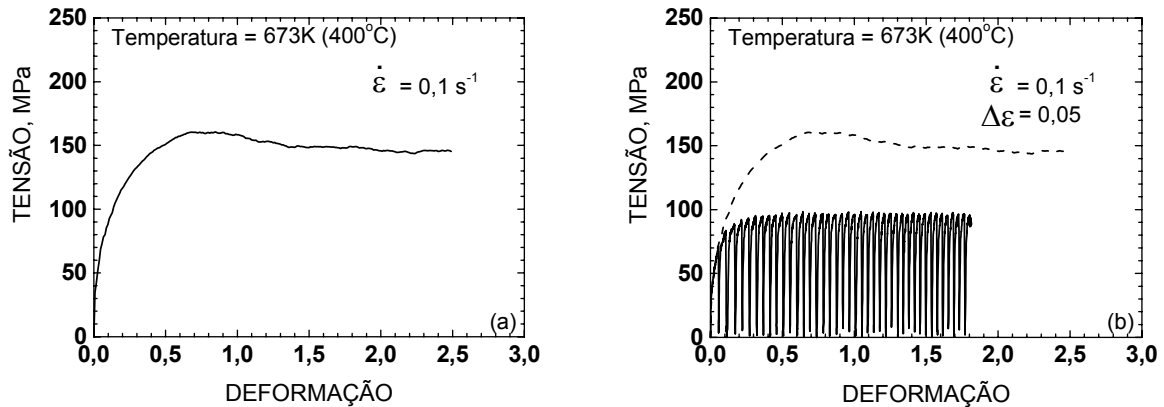


Figura 1. Curva tensão equivalente x deformação equivalente para ensaios de torção do cobre ($T = 400^{\circ}\text{C}$ e taxa de deformação = $0,1\text{ s}^{-1}$): (a) monotônica e (b) cíclica.

No estudo do amaciamento estático do cobre submetido ao ensaio de torção monotônica a morno, a uma temperatura de 400°C e taxa de deformação de $0,1\text{ s}^{-1}$, foram realizadas interrupções programadas para intervalos de tempos conhecidos seguida de recarregamento nas mesmas condições anteriores. A deformação escolhida para interrupção foi de 1,5, onde a recristalização dinâmica encontrava-se completamente desenvolvida (regime estacionário).

Foram realizados vários ensaios para determinação da fração amaciada em função do tempo. A Figura 2 apresenta as curvas tensão equivalente x deformação equivalente para apenas dois ensaios, uma vez que todos os outros foram semelhantes, variando apenas o formato da curva após a interrupção em função da fração amaciada. O resultado do ensaio com tempo de interrupção de 1,05s está mostrado na Figura 2(a). Pode-se verificar que a tensão, após interrupção e retomada do teste, foi inferior à tensão imediatamente anterior à interrupção, ocorrendo o amaciamento estático de 8,5%. Observou-se também um discreto pico de recristalização dinâmica após interrupção e retomada do teste. A Figura 2 (b) mostra um outro ensaio para cálculo da fração amaciada com tempo de 20s. Nesse caso, a curva após interrupção foi bem semelhante à curva inicial, ocorrendo apenas um decréscimo na tensão de pico do segundo passe de $\sim 5,5\text{MPa}$. A fração amaciada calculada foi de 78%.

O procedimento acima foi realizado diversas vezes com diferentes tempos de amaciamento entre os passes de torção monotônica, e a fração amaciada foi calculada para cada condição conforme a Tabela 1. É interessante observar que a cinética de amaciamento estático após torção monotônica foi extremamente rápida.

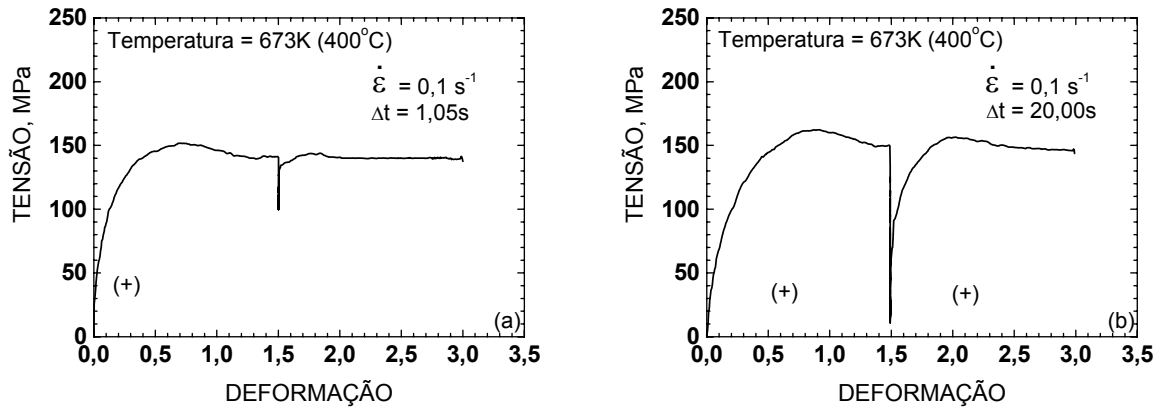


Figura 2. Curvas tensão equivalente x deformação equivalente para ensaios de torção monotônica, com interrupção: (a) 1,05s e (b) 20,00s.

Tabela 1. Amaciamento estático do cobre a 400°C e taxa de deformação de $0,1s^{-1}$ após ensaio de torção monotônica.

Tempo de amaciamento (s)	σ_f (MPa)	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	X (%)
0,10	142	41	142	0
0,36	141	36	136	4,8
0,63	143,5	29	136,5	6,1
1,10	140,5	40	132	8,5
2,10	151	52	127	24,2
3,10	143	36,5	101	39,4
5,10	144,6	48,5	92,7	54,0
20,00	149,5	37,3	62	78,0
50,20	133	37	50,5	85,9
100,50	138,2	38	44,5	93,5
501,10	142	36	42	94,3

Situação semelhante à acima descrita foi encontrada por Petkovic⁽¹³⁾ (cobre) e por Djaic^(16,17) (aço carbono) nos testes de compressão em elevadas temperaturas. No estudo do amaciamento com interrupções dentro do regime estacionário, Petkovic⁽¹³⁾ constatou metalograficamente a presença de três mecanismos de restauração: a recristalização metadinâmica, a recuperação estática e a recristalização estática. No presente trabalho, o amaciamento envolve os três processos descritos e após o intervalo de 500s, pode-se considerar que a fração amaciada foi de 95%.

Para determinar o amaciamento após o ensaio de torção cíclica, a uma temperatura de 400°C e taxa de deformação de $0,1s^{-1}$, a interrupção do ensaio foi realizada após o término do ciclo positivo, esperando-se um tempo pré-determinado e então reiniciando-se o ensaio com o ciclo negativo. O procedimento acima foi realizado diversas vezes com diferentes tempos de amaciamento e a fração amaciada foi calculada para cada condição conforme a Tabela 2.

Tabela 2. Amaciamento estático do cobre a 400°C e taxa de deformação de 0,1s⁻¹ após ensaio de torção cíclica.

Tempo de amaciamento (s)	σ_f (MPa)	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	X (%)
0,30	93	26	88,5	6,7
1,14	95	34	91	6,5
10,17	92	31,5	82	16,5
100,17	90	28	77	21,0
300,60	88	36	77	21,2
500,80	78	32	68	21,7
700,90	94	33	82	19,7

Para o tempo de interrupção de 0,3s, onde ainda não havia amaciamento estático, observou-se uma queda da tensão de fluxo de 6,5% atribuída ao efeito Bauschinger. Observou-se que para tempos inferiores a 1s a fração amaciada no ensaio de torção cíclica foi superior à da monotônica, devido à presença do efeito Bauschinger. Para tempos superiores a 1s a fração amaciada na torção cíclica foi inferior à da monotônica. Na torção cíclica a fração amaciada atinge um patamar em torno de 21% depois de 100s, acreditando-se que o único processo de amaciamento operante foi a recuperação estática. Isso ocorreu, porque a quantidade de deformação acumulada foi insuficiente para iniciar o processo de recristalização estática.

O efeito Bauschinger também foi observado por Bartolomé⁽¹⁴⁾ na torção monotônica e reversa em um aço microligado com Nb, a 1.050°C e taxa de deformação de 0,1s⁻¹. Foi observado que o nível de tensão após reversão foi menor que imediatamente antes desta e considerou-se que o arco formado pelas discordâncias entre pontos de ancoramento não pode reverter instantaneamente de direção, e que pelo menos parte desta tensão de retorno contribuiu de forma a facilitar o deslizamento das discordâncias na recarga.

4 CONCLUSÃO

A torção monotônica do cobre (T = 400°C, taxa de deformação = 0,1s⁻¹ e $\epsilon = 2,5$) apresenta curva de fluxo característica do processo de recristalização dinâmica.

No caso da torção cíclica para a amplitude de deformação ($\Delta\epsilon$) = 0,05 predomina a recuperação dinâmica e as curvas de fluxo não apresentam o pico de recristalização dinâmica.

No estudo do amaciamento estático do cobre submetido ao ensaio de torção monotônica, a uma temperatura de 400°C e taxa de deformação de 0,1s⁻¹, o amaciamento envolve os processos de recristalização metadinâmica, a recuperação estática e a recristalização estática.

Nos ensaios de torção cíclica observou-se a presença do efeito Bauschinger e a fração amaciada atingiu o máximo em torno de 21% (com 100s), tendo como único processo de amaciamento a recuperação estática.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPQ (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e PRONEX (Programa de Núcleos de Excelência) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- 1 COFFIN, L. F.; TAVERNELLI, J. F. The cyclic straining and fatigue of metals. Transactions of the Metallurgical Society of AIME, v. 215, p. 794-807, 1959.
- 2 PINHEIRO, I. P.; Barbosa, Ronaldo; CETLIN, P. R. Restauração dinâmica e evolução microestrutural do cobre deformado a quente por torção cíclica e monotônica. In: CONGRESSO ANUAL – ABM, 59, 2004, São Paulo. Anais...São Paulo. ABM, 2004. p. 3314 - 3323. 1 CD.
- 3 CETLIN, P.R.; CORRÊA, E.C.S; AGUILAR, M.T.P. The effect of the strain path on the work hardening of austenitic and ferritic stainless steels in axisymmetric drawing, Metallurgical and Materials Transactions A, v. 34 A, p.589 – 601, mar.2003.
- 4 LINDH, E. et. al. Effect of redundant deformation on recrystallization behaviour of copper. Scripta Metallurgica et Materialia, v. 29, p. 347-352, 1993.
- 5 HARGREAVES, M. E. et al. In: NPL SYMPOSIUM, 15, 1963, Teddington. Proceedings... Teddington: HMSO, 1963. p. 209.
- 6 ZHANG, X. J.; THOMSON, P. F.; HODGSON, P. D. The stress-strain and recrystallization behaviour for deformation involving a change in strain path. In: CONF. ON THERMOMECHANICAL PROCESSING OF STEELS AND OTHER MATERIALS - THERMEC, 1997, Pennsylvania. Proceedings... Pennsylvania: TMS (T. Chandra; T. Sakai (ed.)), 1997. v.2, p. 1705-1712.
- 7 ZHANG, X. J.; HODGSON, P. D.; THOMSON, P. F. Incorporating the effect of change in strain path in constitutive models of hot deformation. In: AUSTRALASIA PACIFIC FORUM ON INTELLIGENT PROCESSING AND MANUFACTURING OF MATERIALS - IPPMM, 1997, Brisbane, National Library of Australia. Proceedings...Brisbane: T. Chandra; S. R. Leclair; J. A. Meech; B. Verma; M. Smith; B. Balachandran (ed.), 1997. p.941 - 947.
- 8 DIETER, G. E. Workability testing techniques. Ohio: American Society for Metals, 1984, 294 p.
- 9 MACCAGNO, T. M.; JONAS, J. J. Correcting for the effects of static and metadynamic recrystallization during the laboratory simulation of rod rolling. ISIJ International, v. 34, n. 7, p. 607-614, 1994.
- 10 MACCAGNO, T. M.; YUE, S.; JONAS, J. J.; DYCH, K. Simulated hot working, cold working, and annealing of Al-containing steels. Metallurgical Transactions A, v. 24A, p.1589-1596, 1993.
- 11 TEGART, W. J. McG. Elements of mechanical metallurgy. New York:MacMillan Company, 1967, 259 p.
- 12 JONAS, J.J.; MACCAGNO, T.M.; YUE,S. The role of dynamic recrystallization in industrial hot working. In: ANNUAL CIM CONFERENCE OF METALLURGISTS, 34, 1995, Vancouver. Proceedings... Vancouver, 1995.
- 13 PETKOVIC, R. A.; LUTON, M. J.; JONAS, J. J. Recovery and recrystallization of polycrystalline copper after hot working. Acta Metallurgica, v. 27, p. 1633-1648, 1979.
- 14 BARTOLOMÉ, R.; GUTIÉRREZ, I.; FUENTES, M. Effect of the strain reversal on the recrystallization of a microalloyed steel. In: THE FOURTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON RECRYSTALLIZATION AND RELATED PHENOMENA, July 1999, Tsukuba, Japan, Japan Institute of Metals. Proceedings... Tsukuba: T. Sakai; H. G. Suzuki (ed.), 1999. p. 709-714.
- 15 ARMSTRONG, P. E.; HOCKETT, J. E. Large strain multidirectional deformation of 1100 aluminum at 300K. J. Mech. Phys. Solids, v. 30, n. 1/2, p. 37-58, 1982.
- 16 DJAIC, R. A. P.; JONAS, J. J. Recrystallization of high carbon steel between intervals of high temperature deformation. Metallurgical Transactions, v. 4, p. 621-624, 1973.
- 17 DJAIC, R.A.P.; JONAS, J.J. Static recrystallization of austenite between intervals of hot working. Journal of The Iron and Steel Institute, p.256-261, Apr. 1972.