

INFLUÊNCIA DO VALOR DA PRÉ-DEFORMAÇÃO EM TRAÇÃO NA CAPACIDADE DE ENCRUAMENTO POR CISALHAMENTO ORTOGONAL DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 430E¹

Wellington Lopes²
Elaine Carballo Siqueira Corrêa³
Haroldo Béria Campos⁴
Maria Teresa Paulino Aguiar⁵
Paulo Roberto Cetlin⁶

Resumo

Este trabalho estuda a influência da quantidade de pré-deformação em tração na capacidade de encruamento do aço inoxidável AISI 430E submetido à seqüência de carregamento tração/cisalhamento (seqüência ortogonal). Para tanto, o material foi pré-tracionado de 6%, 14% e 20% de deformação efetiva e posteriormente cisalhado monotonicamente. Transientes na taxa de encruamento, amaciamento e redução da ductilidade foram detectados e relacionados com a provável evolução da subestrutura do material.

Palavras-chave: Aço AISI 430E; Ensaio de cisalhamento; Encruamento; Pré-deformação.

THE INFLUENCE OF PREVIOUS TENSILE STRAINING ON THE SUBSEQUENT HARDENING UNDER ORTHOGONAL SHEARING OF AISI 430E STAINLESS STEEL

Abstract

This paper studies the influence of the amount of tensile prestraining on the work-hardening capacity of the AISI 430E stainless steel submitted to the loading sequence tension/shear (orthogonal sequence). The material was prestrained in tension up to 6%, 14% and 20% effective strain and later monotonically sheared. Work-hardening rate transients, softening and reduction of the ductility were detected and related with the probable substructure evolution of the material.

Key words: AISI 430E stainless steel; Shear test; Work-hardening; Prestraining; Strain path.

¹ *Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.*

² *Aluno de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da UFMG, Rua Espírito Santo 35, B.Hte., Minas Gerais, Cep. 31130-030.*

³ *Doutora, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Rua Espírito Santo 35, B.Hte., Minas Gerais, Cep. 31130-030.*

⁴ *Professor Associado, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, beriacampos@uol.com.br*

⁵ *Professora Associada, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia de Materiais e da Construção Civil*

⁶ *Professor titular, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.*

1 INTRODUÇÃO

Muitos dos processos de conformação de chapas empregam mudanças complexas na trajetória de deformação. Desta forma, para a obtenção de produtos acabados com as características pré-estabelecidas é fundamental que parâmetros importantes como a capacidade de encruamento e de deformação plástica de um material sejam previamente conhecidos.

Assim, diversas técnicas de ensaios foram criadas para submeter os materiais à seqüências de carregamento diversificadas. Dentre elas, a técnica de cisalhamento planar simples^(1,2) tem mostrado ser a mais adequada para chapas finas de aço. Esse ensaio pode ser utilizado, dentre outras possibilidades, para caracterizar a anisotropia plástica decorrente da mudança na trajetória de deformação assim como para descrever a evolução do encruamento com a deformação.

Nas situações onde um material é submetido às mudanças na trajetória de deformação, sua capacidade de encruamento e propriedades mecânicas, em geral, não obedecem aos modelos previstos por carregamentos monotônicos. Assim, para que propriedades como essas sejam descritas adequadamente, é necessário o uso de técnicas de ensaio que sejam capazes de impor a um material uma seqüência de carregamento com diferentes estados de sollicitação mecânica.

1.1 Mudanças na trajetória de deformação e encruamento

O comportamento não-usual do encruamento apresentado por um determinado material após a mudança na trajetória de deformação tem sido estudado por muitos autores nos últimos anos.⁽³⁻⁵⁾ A característica comum em todos esses trabalhos consiste na investigação das principais variáveis que resultam no comportamento diferenciado dos materiais submetidos a mudanças na trajetória de deformação, como por exemplo, o surgimento de amaciamento ou endurecimento anômalos.

No trabalho desenvolvido por Corrêa et al.⁽⁶⁾ com aço baixo carbono e latão, são comprovadas as influências da seqüência de carregamento, do tipo de material empregado e da subestrutura desenvolvida durante a pré-deformação na capacidade de encruamento do material após a mudança na trajetória de deformação. Rauch et al.⁽³⁾ destacam que quanto maior for o valor da pré-deformação, maior será a flutuação da taxa de encruamento, no caso das ligas de alumínio AA1050 e 6022-T4 quando solicitadas por carregamentos com reversão da deformação.

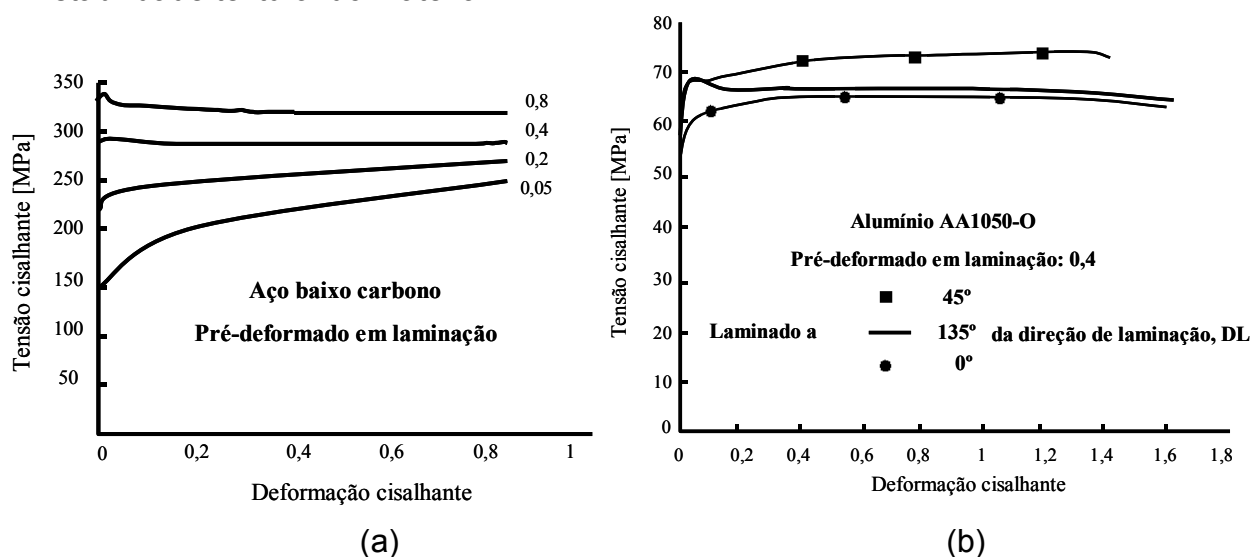
Materiais como o aço baixo carbono livre de intersticiais e o cobre puro quando submetidos a mudanças severas na trajetória de deformação apresentam amaciamento. Para tanto, são empregadas seqüências do tipo ortogonal,⁽⁷⁾ representadas, dentre outras combinações de carregamento, pela pré-deformação em tração seguida por cisalhamento na mesma direção da tração. Essa seqüência é caracterizada por possuir o parâmetro α , que descreve a severidade da mudança na trajetória de deformação igual a zero.⁽⁸⁾

A seqüência ortogonal, quando empregada nos aços baixo carbono, causa aumento da tensão necessária à deformação plástica do material no início do segundo modo de deformação, seguido por amaciamento e novamente endurecimento.^(9,10) O amaciamento do material decorre da formação de microbandas de cisalhamento, responsáveis pela instabilidade e localização da

deformação plástica podendo ocasionar a fratura do material.^(7,11-12) Lewandowska⁽¹³⁾ afirma ainda que quanto maior o valor de pré-deformação, maior tende a ser o número de grãos que irão conter microbandas, conforme observado nas ligas de alumínio AA5182 e AA6016.

Entretanto, esse comportamento não é observado para o aço Dual Phase DP600 investigado por Gardey et al.⁽¹⁴⁾ quando submetido a uma seqüência do tipo ortogonal. Nesse caso, o material escoou no recarregamento, num nível de tensão inferior em relação ao carregamento monotônico e subseqüentemente endureceu com uma taxa de encruamento maior. Essa situação foi explicada pela ausência de desestabilização severa na estrutura de deslocamentos após a mudança na trajetória de deformação.

Embora a explicação pela ocorrência do amaciamento esteja relacionada, na maioria dos materiais, com a formação das microbandas, sua origem pode ser diferente. No trabalho de Lopes et al.,⁽¹⁵⁾ o aço com baixo carbono e a liga de alumínio AA1050-O foram pré-deformados em laminação e posteriormente cisalhados. Para o aço baixo carbono, o cisalhamento foi feito a 90° em relação à direção de laminação, DL, ($\alpha = 0$), utilizando quatro valores de pré-deformação: 0,05; 0,2; 0,4 e 0,8; (Figura 1a). Já a liga de alumínio foi pré-deformada em laminação de 0,4 em diferentes direções, a 0°DL, ($\alpha = 0$), 45°DL, ($\alpha = 0,5$) e a 135°DL, ($\alpha = -0,5$) e posteriormente cisalhada a 90° em relação à direção de laminação, (Figura 1b). Para o aço baixo carbono, o amaciamento ocorreu com o aumento do valor da pré-deformação em laminação, (Figura 1(a)), e foi relacionado com a formação das microbandas de cisalhamento. Já a liga de alumínio AA1050-O, o amaciamento ocorreu somente quando cisalhado a 135°DL, (Figura 1(b)). Nessa situação não houve formação de microbandas de cisalhamento nem localização da deformação plástica. O amaciamento foi relacionado com a queda do fator de Taylor o que indica instabilidade textural do material.



Fonte: Figuras 1 e 2, Lopes et al.⁽¹⁵⁾

Figura 1. Curvas tensão cisalhante em função da deformação cisalhante para amostras pré-deformadas em laminação (a) aço baixo carbono, (b) alumínio puro.

1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho consiste em avaliar a influência exercida pela quantidade de pré-deformação na capacidade de encruamento do aço inoxidável

AISI 430E. Desta forma, foi promovida uma mudança severa na trajetória de deformação mediante o emprego da seqüência ortogonal obtida através da seqüência de carregamento do tipo tração/cisalhamento.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material

Chapas de aço inoxidável AISI 430E com espessura de 0.61mm, cortadas a 0°DL, foram usadas neste trabalho. O material foi utilizado no estado como recebido, sem nenhum tipo de tratamento térmico posterior.

2.1 Pré-deformação em Tração

As chapas de aço AISI 430E foram pré-tracionadas de três valores de deformação efetiva, $\varepsilon_{\text{efet}}$: 6%, 14% e 20%. As pré-deformações foram conduzidas na máquina de ensaios INSTRON 5582 com taxa de deformação de $2 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$. A Figura 2 mostra os corpos de prova pré-deformados.



Figura 2. Corpos de prova pré-deformados em tração de 6%, 14% e 20% $\varepsilon_{\text{efet}}$.

2.2 Ensaio de Cisalhamento Planar Simples

As amostras pré-tracionadas foram cortadas para retirada de corpos de prova para cisalhamento monotônico na mesma direção da tração prévia. Assim, foram utilizados corpos de prova retangulares planos com 50mm de comprimento (L), 15mm de largura total da chapa, w, 3,50mm de largura efetiva submetida ao cisalhamento, b, e 0,60mm de espessura, (t), (Figura 3). Os testes foram conduzidos na máquina de ensaios INSTRON 5582 adaptada com uma garra de cisalhamento, sendo esta construída de acordo com os procedimentos de Rauch^(7,16) e Fjeldly et al.⁽¹⁷⁾ A velocidade do cabeçote da máquina de ensaios foi calculada para obtenção de um valor de taxa de deformação de aproximadamente $2 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$.

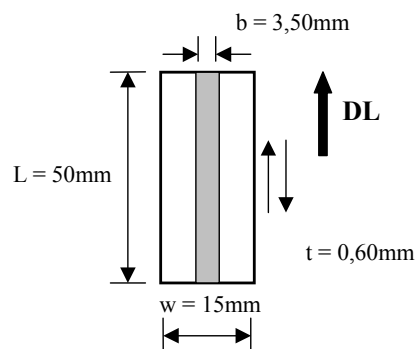


Figura 3. Esquema do corpo de prova para cisalhamento monotônico, as setas indicam o sentido do cisalhamento.

Para comparar os estados gerais de tensão e deformação obtidos sob carregamento trativo e cisalhante foram definidas a tensão e deformação efetivas, σ_{efet} e $\varepsilon_{\text{efet}}$, respectivamente. Baseado no trabalho de Rauch⁽⁷⁾, foi usado o parâmetro 1,84 para comparar as respostas do aço inoxidável AISI 430E mediante solicitações diferentes.

Uma vez conhecidos os valores de tensão e deformação cisalhantes, os valores da tensão e deformação efetivas foram definidos através das Equações (1) e (2):

$$\sigma_{\text{efet}} = 1,84 \times \tau \quad (1)$$

$$\varepsilon_{\text{efet}} = \gamma / 1,84 \quad (2)$$

onde:

τ = tensão cisalhante [MPa];

γ = deformação cisalhante.

2.2 Seqüência Ortogonal

Os corpos de prova pré-deformados em tração, (Figura 4(a)), foram cortados com uso de uma guilhotina, (Figura 4(b)), para obtenção das amostras para cisalhamento monotônico posterior, (Figura 4(c)).

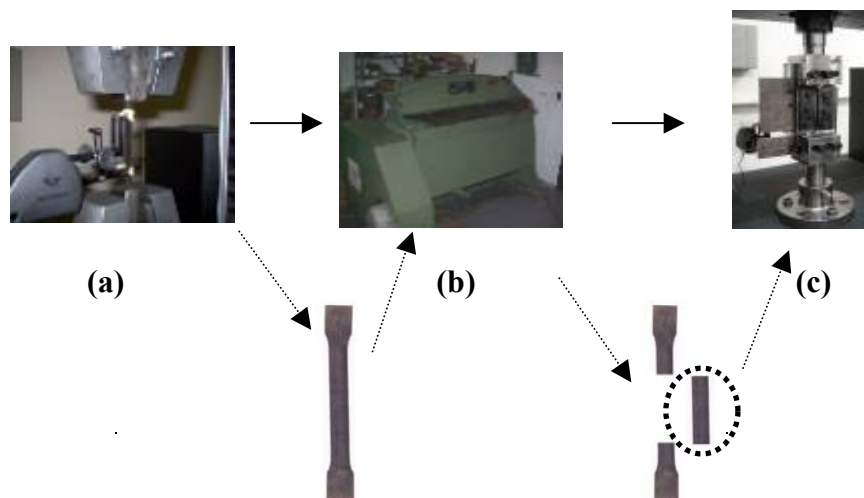


Figura 4. Seqüência ortogonal: (a) pré-deformação em tração, (b) corte guilhotina Newton, (c) cisalhamento monotônico.

3 RESULTADOS

A Figura 5 mostra a curva tensão efetiva em função da deformação efetiva para o aço AISI 430E pré-deformado de 6%, 14% e 20% de deformação efetiva. Pode-se perceber que todos os valores de pré-deformação apresentaram tensão de fluxo inicial maior em relação ao carregamento monotônico em cisalhamento. Quanto maior o valor de pré-deformação, maior foi a resistência ao escoamento no recarregamento em cisalhamento.

É observado ainda um período de queda na taxa de encruamento no recarregamento em cisalhamento, cuja extensão aumenta com o acréscimo do valor de pré-deformação, indicado na Figura 5 por uma seta.

A Figura 6 mostra a razão entre o limite de escoamento das amostras pré-deformadas e a tensão de fluxo durante o carregamento monotônico para o mesmo valor de deformação, LE/σ_{ys} . Esse parâmetro, usado por Fernandes et al.⁽¹⁸⁾ é conhecido como tensão de escoamento normalizada e também pode ser usado para indicar a severidade da mudança na trajetória de deformação. Quanto maior o seu valor, (acima da unidade), mais severa terá sido a mudança na trajetória de deformação.

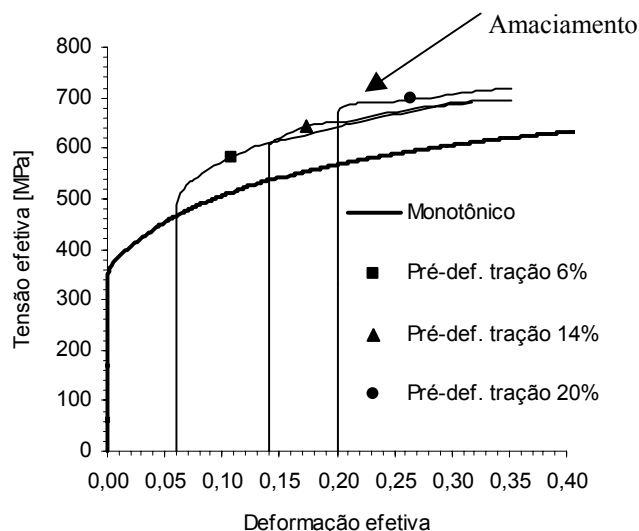


Figura 5. Curva tensão efetiva em função da deformação efetiva para diferentes valores de pré-deformação em tração para o aço AISI 430E.

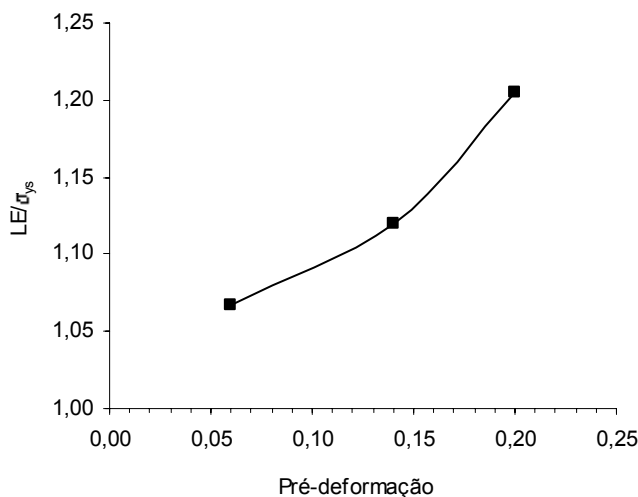


Figura 6. Curva da tensão de escoamento normalizada, LE/σ_{ys} , em função do valor de pré-deformação em tração para o aço AISI 430E.

As Figuras 7 e 8 mostram a influência da mudança na trajetória de deformação e da quantidade de pré-deformação em tração na ductilidade do material e na capacidade de encruamento, respectivamente.

A análise da ductilidade do aço AISI 430E após a mudança na trajetória de deformação é feita através do cálculo da deformação residual uniforme, ϵ_{ur} , de acordo com a definição dada por Corrêa.⁽¹⁹⁾ A Figura 7 mostra que a ductilidade do

aço AISI 430E foi sensível à mudança na trajetória de deformação pelo fato da curva do material pré-deformado não coincidir com a curva teórica e diminuir com o acréscimo do valor da pré-deformação em tração.

A instabilidade da taxa de encruamento do aço AISI 430E após a mudança na trajetória de deformação é mostrada na Figura 8. Nessa figura, a localização da deformação plástica irá ocorrer quando $\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \cdot \frac{1}{\sigma} < 1$ segundo definição dada por Zandrahimi et al.⁽²⁰⁾ Com o aumento do valor da pré-deformação, mais extenso é o período de instabilidade da taxa de deformação.

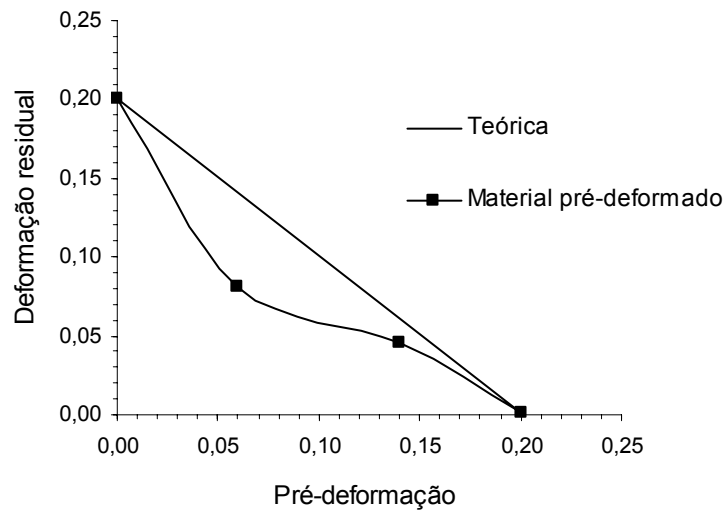


Figura 7. Análise da ductilidade do aço AISI 430E após a mudança na trajetória de deformação.

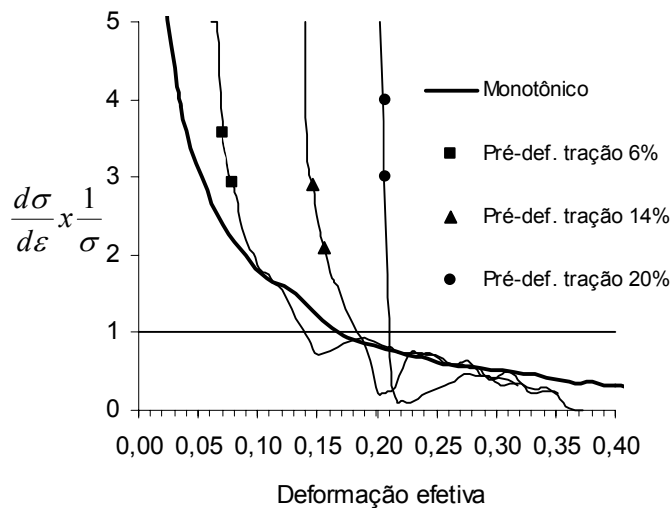


Figura 8. Evolução da taxa de encruamento do aço AISI 430E em função do valor da pré-deformação em tração.

4 DISCUSSÃO

A capacidade de encruamento de um material após a mudança na trajetória de deformação é dependente, dentre outros fatores, da subestrutura de deslocação desenvolvida durante a pré-deformação, do tipo de material empregado e da seqüência de carregamento.^(21,22)

Os resultados encontrados mostraram que o aço AISI 430E quando submetido à seqüência do tipo ortogonal, se comportou de maneira semelhante ao observado no aço baixo carbono livre de intersticiais⁽²³⁾ e oposto à liga de alumínio AA1050-O.⁽²⁴⁾ Assim, para todos os valores de pré-deformação pesquisados, o aço AISI 430E apresentou tensão de fluxo inicial maior em relação ao carregamento monotônico em cisalhamento, (Figura 5).

O comportamento da tensão de fluxo após a mudança na trajetória de deformação foi avaliado através do cálculo da tensão de escoamento normalizada⁽¹⁸⁾, mostrado na Figura 6. A seqüência ortogonal quando aplicada ao aço inoxidável AISI 430E ocasionou um aumento da tensão de fluxo inicial dependente do valor da pré-deformação. Assim, a situação mais severa foi registrada para o valor de pré-deformação de 20%, que registrou o maior valor da razão LE/σ_{ys} .

O aumento da tensão de fluxo inicial no recarregamento foi acompanhado por uma redução no alongamento uniforme do aço AISI 430E. A Figura 7 mostrou que a ductilidade do aço AISI 430E é sensível à mudança na trajetória de deformação, apresentando menor valor de deformação residual uniforme com o acréscimo do valor de pré-deformação. A situação é semelhante à descrita por Lloyd e Sang⁽²⁵⁾ para as ligas de alumínio AA1100-O e AA3003-O.

A habilidade da mudança na trajetória de deformação em afetar a capacidade de encruamento de um material depende fortemente da subestrutura de deslocações formada durante a pré-deformação.⁽²⁶⁾ Além disso, o tipo de material empregado (características estruturais próprias) e a seqüência de carregamento utilizada contribuem para a geração de um comportamento não-usual de encruamento o qual pode conduzir ao amaciamento e antecipar a fratura do metal.

O aço AISI 430E apresentou para todos os valores de pré-deformação um regime transiente que se estendeu com o acréscimo da pré-deformação em tração.⁽¹¹⁾ Esse transiente é caracterizado por um aumento da tensão necessária ao escoamento no recarregamento seguido por um período de queda da taxa de encruamento que se recupera posteriormente, conforme mostrado na Figura 8. Esse fato é explicado pelo deslizamento rápido das deslocações ao longo das microbandas de cisalhamento geradas durante a pré-deformação do material.⁽²⁷⁾

Estudos anteriores com uso de microscopia eletrônica de transmissão mostraram que os efeitos macroscópicos da seqüência ortogonal, tais como a mudança da tensão necessária ao escoamento e o aparecimento de transientes no encruamento são decorrentes do desenvolvimento e evolução das estruturas de deslocações⁽²⁸⁻²⁹⁾ e da nucleação e propagação das microbandas de cisalhamento formadas durante a pré-deformação.⁽³⁰⁻³²⁾ Desta forma, o nível de tensão necessário à formação das microbandas que poderão cruzar a estrutura de deslocações formada durante a pré-deformação, corresponderá à maior tensão de escoamento no recarregamento. Considerando os resultados encontrados para o aço AISI 430E, quanto maior o valor de pré-deformação em tração, maior tende a ser a quantidade de microbandas formadas, e que posteriormente irão cisalhar as paredes de deslocações geradas durante a pré-deformação.

5 CONCLUSÕES

- O aço AISI 430E apresentou comportamento semelhante ao observado para o aço carbono livre de intersticiais e cobre puro quando submetido à seqüência do tipo ortogonal: aumento da resistência ao escoamento seguido por transiente na taxa de encruamento, para valores de pré-deformação em tração de 6%, 14% e 20%;
- A seqüência ortogonal (tração/cisalhamento) ocasionou redução da ductilidade com o aumento da quantidade de pré-deformação;
- A extensão da queda na taxa de encruamento do aço AISI 430E depende da quantidade de pré-deformação quando solicitado mediante seqüência do tipo ortogonal.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPEMIG, CNPq e CAPES pelo suporte para a concretização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 GENEVOIS, P. Etude expérimental et modélisation du comportement plastique anisotrope de tôles d'acier en grandes déformations. Ph.D. Thesis. Institut National Polytechnique de Grenoble, France, (1992);
- 2 RAUCH, E.F., G'SELL, C. *Flow localisation induced by a change in strain path in mild steel*. Materials Science and Engineering, v.111A, p. 71-80, (1989);
- 3 RAUCH, E.F., GRACIO, J.J., BARLAT, F., LOPES, A.B.; FERREIRA DUARTE, J.V. *Hardening behavior and structural evolution upon strain reversal of aluminum alloys*. Scripta Materialia, v.46, p. 881-886, (2002);
- 4 VIEIRA, M.F., FERNANDES, J.V. *Plastic behaviour of copper sheets subjected to a double strain-path change*. Journal of Materials Processing Technology, v.47, nº3, p. 261-272, (1995);
- 5 WILSON, D.V., ZANDRAHIMI, M.; ROBERTS, W.T. *Effects of changes in strain path on work hardening in CP aluminum and an Al-Cu-Mg alloy*. Acta Metallurgica et Materialia, v.38, n. 2, p. 215-226, (1990);
- 6 CORRÊA, E.C.S., AGUILAR, M.T.P., SILVA, E.M.P., CETLIN, P.R. *The effect of sequential tensile and cyclic torsion straining on work hardening of steel and brass*. Journal of Materials Processing Technology, v.142, p. 282-288, (2003);
- 7 RAUCH, E.F. *The flow law of mild steel under monotonic or complex strain path*. Solid State Phenomena, v.23 - 24, p. 317-334, (1992);
- 8 SCHMITT, J.H., AERNOUDT, E., BAUDELET, B. *Yield loci for polycrystalline metals without texture*. Materials Science and Engineering, v.75, p. 13-20, (1985);
- 9 THUILLIER, S., RAUCH, E.F. *Development of microbands during cross loading*. Acta Metallurgica et Materialia, v.42, p. 1973-1983, (1994);
- 10 HU, Z., RAUCH, E.F.; TEODOSIU, C. *Work-hardening behavior of mild steel under stress reversal at large strains*. International Journal of Plasticity, v.8, p. 839-859, (1992);
- 11 RAUCH, E.F., SCHMITT, J.H. *Dislocation substructures in mild steel deformed in simple shear*. Materials Science Engineering, v.113A, p. 441-448, (1989);

- 12 WILSON, D.V., BATE, P.S. *Influence of cell walls and grain boundaries on transient responses of an IF steel to changes in strain path*. Acta Metallurgica et Materialia, v.42, p. 1099-1111, (1994);
- 13 LEWANDOWSKA, M. *Dependence of the deformation microstructure of aluminum alloys on the strain path*. Materials Chemistry and Physics, v.81, p. 555-557, (2003);
- 14 GARDEY, B., BOUVIER, S., RICHARD, V., BACROIX, B. *Texture and dislocation structures in a dual-phase steel under strain-path changes at large deformation*. Materials Science and Engineering, v.400-401A, p. 136-141, (2005);
- 15 LOPES, A.B., RAUCH, E.F., GRACIO, J.J. *Textural vs structural plastic instabilities in sheet metal forming*. Acta Materialia, v.47, nº3, p. 859-866, (1999);
- 16 RAUCH, E.F. *Plastic anisotropy of sheet metals determined by simple shear tests*. Materials Science Engineering, v.241A, p. 179-183, (1998);
- 17 FJELDLY, A., ROVEN, H.J.; RAUCH, E.F. *Shear deformation properties of extruded AlZnMg alloys*. Scripta Materialia, v.38, p. 709-714, (1998);
- 18 FERNANDES, J.V., RODRIGUES, D.M., MENEZES, L.F., VIEIRA, M.F. *A modified Swift law for prestrained materials*. International Journal of Plasticity, v.14, nº6, p. 537-550, (1998);
- 19 CORRÊA, E.C.S. *Aspectos do encruamento de metais previamente deformados a frio*, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, 2004, 233f. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas);
- 20 ZANDRAHIMI, M., PLATIAS, S., PRICE, D., BARRETT, D., BATE, P.S., ROBERTS, W.T., WILSON, D.V. *Effects of changes in strain path on work hardening in cubic metals*. Metallurgical Transactions, v.20A, p. 2471-2482, November, (1989);
- 21 CORRÊA, E.C.S., AGUILAR, M.T.P., MONTEIRO, W.A., CETLIN, P.R. *Work hardening behavior of prestrained steel in tensile and torsion tests*. Journal of Materials Science Letters, v.19, p. 779-781, (2000);
- 22 CORRÊA, E.C.S., AGUILAR, M.T.P., CETLIN, P.R. *The effect of tension/torsion strain path changes on the work hardening of Cu–Zn brass*. Journal of Materials Processing Technology, v.124, p. 384-388, (2002);
- 23 NESTEROVA, E.V., BACROIX, B., TEODOSIU, C. *Experimental observation of microstructure evolution under strain-path changes in low-carbon IF steel*. Materials Science Engineering, v.309-310A, p. 495-499, (2001);
- 24 GRACIO, J.J., RAUCH, E.F. *Analysis of plastic instability in commercially pure Al alloys*. Journal of Materials Processing Technology, v.103, p. 160-164, (2000);
- 25 LLOYD, D.J., SANG, H. *The influence of strain path on subsequent mechanical properties – orthogonal tensile paths*. Metallurgical Transactions, v.10A, p. 1767-1772, November, (1979);
- 26 DAVENPORT, S.B., HIGGINSON, R.L. *Strain path effects under hot working: an introduction*. Journal of Materials Processing Technology, v.98, p. 267-291, (2000);
- 27 HADDADI, H., BOUVIER, S., BANU, M., MAIER, C., TEODOSIU, C. *Towards an accurate description of the anisotropic behaviour of sheet metals under large plastic deformations: Modelling, numerical analysis and identification*. International Journal of Plasticity, v.22, p. 2226-2271, (2006);
- 28 RAUCH, E.F.; THUILLIER, S. *Rheological behavior of mild steel under monotonic loading conditions and cross-loading*. Materials Science Engineering, v.164A, p. 255-259, (1993);

- 29 NESTEROVA, E.V., BACROIX, B., TEODOSIU, C. *Microstructure and texture evolution under strain-path changes in low-carbon interstitial-free steel*. Metallurgical Transactions, v.32A, p. 2527-2538, (2001);
- 30 KORBEL, A., TYS, J., SZCZERBA, M. *Mechanisms of plastic flow and strain hardening of Cu–Al crystals at large deformations*. Acta Materialia, v.32, n°12, p. 2215-22219, (1985);
- 31 KORBEL, A., MARTIN, P.L. *Microscopic versus macroscopic aspect of shear bands Deformation*. Acta Materialia, v.34, n°10, p. 1905-1909, (1986);
- 32 KORBEL, A., EMBURY, J.D., HATHERLY, M., MARTIN, P.L., ERBSLOH, H.W. *Microstructural aspects of strain localization in Al–Mg alloys*. Acta Materialia, v.34, n°10, p. 1999-2009, (1986).