

EFEITO DA DEFORMAÇÃO REVERSA NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 430E¹

Wellington Lopes²
Paulo Roberto Cetlin³
Elaine Carballo Siqueira Corrêa³
Maria Teresa Paulino Aguiar⁴
Haroldo Béria Campos⁵

Resumo

O comportamento mecânico do aço inoxidável AISI 430E sob deformação reversa em diferentes direções foi estudado aplicando o ensaio de cisalhamento planar simples. Foram feitas análises quantitativas das respostas apresentadas pelo material em decorrência da mudança na trajetória de deformação relacionando-as com a modificação na subestrutura.

Palavras-chave: Aço AISI 430E; Deformação reversa; Efeito Bauschinger; Ensaio de cisalhamento.

EFFECT OF REVERSE DEFORMATION ON MECHANICAL BEHAVIOR OF AISI 430E STAINLESS STEEL

Abstract

The mechanic behavior of AISI 430E stainless steel under reverse deformation in different directions was studied applying simple shear test. They were made quantitative analyses of the answers presented by the material due to the change in the strain path relating them with the modification in the substructure.

Key words: Reverse deformation; Bauschinger effect; Shear testing; AISI 430E stainless steel.

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

² Aluno de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFMG, Av. Antônio Carlos, 6627, Campus da Pampulha, B.Hte., Minas Gerais, Cep. 32270-901.

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

⁴ Doutor, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia de Materiais e da Construção Civil, Rua Espírito Santo 35, B.Hte., Minas Gerais, Cep. 31130-030.

⁵ Doutor, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Antônio Carlos, 6627. Campus da Pampulha, B. Hte, Minas Gerais, Cep. 32270-901
beriacampos@uol.com.br

1 INTRODUÇÃO

A maneira mais simples de mudar a trajetória de deformação é através da reversão do sentido da deformação. Muitos autores classificam os ensaios com reversão de deformação genericamente de testes Bauschinger, como designado por Teodosiu.⁽¹⁾ Para este tipo de ensaio com pré-deformações de pequeno percentual, a curva de encruamento é associada a uma tensão de escoamento menor e taxa de encruamento inicial maior comparada com a curva obtida no carregamento monotônico. Quanto maior for a pré-deformação, maior será a flutuação da taxa de encruamento que se estenderá acima de alguns décimos de percentual.⁽²⁾

Em 1881, Bauschinger observou que muitos materiais metálicos após uma pré-deformação por tração seguida por um carregamento na direção oposta (compressão), exibiam uma tensão de fluxo inferior àquela alcançada na direção da pré-deformação,⁽³⁾ fenômeno posteriormente denominado de Efeito Bauschinger (BE). Isso ocorre porque a tensão de reação, resultante do empilhamento de deslocamentos em barreiras, durante o primeiro carregamento, estará auxiliando a movimentação das deslocamentos quando a direção do carregamento é revertida. Além disso, quando a direção de carregamento é revertida, podem ser geradas, nas mesmas fontes, deslocamentos de sinais opostos àquelas responsáveis pela deformação na primeira direção do carregamento. Uma vez que deslocamentos de sinais opostos se atraem e se aniquilam mutuamente, o efeito resultante será um amolecimento ainda maior da rede cristalina. Isso explica o fato de ser a curva plástica na direção reversa inferior à curva obtida na direção original de carregamento. O encruamento latente devido à ação das paredes de deslocamentos exerce um papel importante quando novos sistemas de escorregamento são ativados com a mudança na trajetória de deformação. No caso em que muitos dos sistemas de escorregamento que estavam ativos durante o primeiro modo de deformação são ativados novamente, mas no sentido oposto, caso a resistência do material será menor. Conseqüentemente, as deslocamentos responsáveis pela polaridade das paredes de deslocamentos conseguirão se mover livremente no interior das paredes de deslocamentos, fazendo com que a tensão de escoamento seja reduzida.⁽⁴⁻⁶⁾

Apesar de todos os metais apresentarem o efeito Bauschinger, sua magnitude será diferenciada, sendo dependente, por exemplo, do valor da pré-deformação.⁽⁷⁾ Porém, este fenômeno é muito mais complexo que somente uma diminuição da tensão de escoamento na direção reversa, de fato, toda a forma da curva de encruamento do segundo carregamento é modificada.⁽⁸⁾

O efeito Bauschinger pode ter importantes conseqüências na conformação de metais. Por exemplo, o dobramento de chapas de aço⁽⁹⁾ resulta num amolecimento, como salientado por Polakowski,⁽¹⁰⁾ quando metais severamente trabalhados a frio são submetidos a cargas de sinal contrário. O melhor exemplo disso é o desempenho de barras estiradas ou folhas laminadas pela passagem através de rolos que aplicam no material tensões de dobramento alternadas. Tais operações de aplainamento com rolos podem reduzir a tensão de escoamento e aumentar a elongação comparada com o seu valor do estado trabalhado a frio. Como principais características, o BE possui associado diminuição da tensão de fluxo após a reversão da direção de deformação acompanhada por uma estagnação para em seguida apresentar recuperação da taxa de encruamento com o acréscimo da deformação, segundo Bacroix et al.⁽¹¹⁾

Usualmente, a mudança na trajetória de deformação durante a deformação plástica ocasiona dois tipos básicos de efeitos transientes na curva tensão-deformação:

- a) Tipo 1: o primeiro tipo corresponde a uma tensão de fluxo inicial mais baixa acompanhada por aumento do encruamento;
- b) Tipo 2: o segundo tipo apresenta tensão de fluxo inicial maior e posteriormente menor encruamento, segundo Chung e Wagoner,⁽¹²⁾ conforme apresentado na Figura 1:

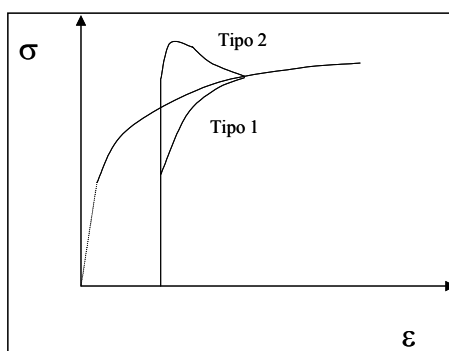


Figura 1. Esquema representativo dos dois tipos de comportamento mecânico mediante alteração na trajetória de deformação

1.1 Caracterização da Mudança na Trajetória de Deformação

Schmitt et al.⁽⁵⁾ propuseram a designação do parâmetro α para referenciar o grau de severidade com a mudança na trajetória de deformação. Este parâmetro consiste no produto escalar dos tensores de deformação impostos respectivamente durante a pré-deformação e a deformação subsequente, sendo definido através da relação mostrada na Equação (1):

$$\alpha = \frac{d_{\varepsilon p} \cdot d_{\varepsilon}}{\|d_{\varepsilon p}\| \|d_{\varepsilon}\|} \quad (1)$$

Em que $d_{\varepsilon p}$ e d_{ε} representam, na forma de vetor, os tensores deformação plástica durante a pré-deformação e a deformação subsequente.

Por definição, esse parâmetro varia entre 1 (situação em que não existe alteração na trajetória de deformação) e -1 (situação em que o sentido de aplicação da carga é invertido, ou seja, conforme acontece nos testes Bauschinger). O valor de α está relacionado com o nível de atividade dos sistemas de escorregamento em função da mudança na trajetória de deformação. Para aqueles com $\alpha = -1$, caracterizados por apresentarem reversão da carga, tem-se que os sistemas de escorregamento são reativados, mas na direção reversa, compreendendo, por exemplo, tração seguida de compressão e cisalhamento a 0° DL (Direção de Laminação) seguido de cisalhamento a 180° DL, técnica esta última empregada neste trabalho.

1.2 Cisalhamento Planar Simples

Apesar de existirem numerosos dados de plasticidade cíclica para diversos materiais metálicos, existem poucos trabalhos publicados de deformação cíclica em chapas metálicas, especialmente num elevado nível de deformação associado. Uma das razões para esta situação é que os experimentos convencionais envolvendo tração seguida por compressão em chapas finas, necessitam de adaptações no corpo de prova para permitir a realização do ensaio de compressão sem o surgimento de flambagem conforme experimentos feitos por Geng e Wagoner,⁽¹³⁾ LI et al.,⁽¹⁴⁾ Lee et al.⁽¹⁵⁾ e Boger et al.⁽¹⁶⁾ Entretanto, o ensaio de cisalhamento, descrito por Rauch e Schmitt⁽¹⁷⁾ e utilizado por Hu⁽¹⁸⁾ no aço baixo carbono mediante testes cíclicos, tem se mostrado ser a técnica mais versátil para realização dos ensaios do tipo Bauschinger, pois utiliza corpo de prova com geometria simples, ausência de uma zona de estricção e um elevado valor de deformação homogênea praticável.^(11,19,20)

1.3 Objetivos do Trabalho

Neste trabalho será investigado o comportamento mecânico de uma amostra de aço inoxidável AISI 430E submetida a um teste Bauschinger (reversão da deformação) com uso da técnica de cisalhamento planar simples, ao contrário do procedimento mais comumente usado por meio de testes unidirecionais como tração seguida por compressão. Aspectos relacionados com a taxa de encruamento, limite elástico e relações da subestrutura do material após a mudança na trajetória de deformação serão considerados para qualificar e quantificar o comportamento mecânico apresentado pelo material após a reversão da deformação.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material

Chapas de aço inoxidável AISI 430E com espessura de 0.61mm foram usadas neste trabalho. O material foi utilizado no estado como recebido com corpos de provas cortados em três direções em relação à direção de laminação: 0°DL, 45°DL e 90°DL.

2.2 Ensaio de Cisalhamento Planar Simples

Para realização do ensaio de cisalhamento foram utilizadas amostras retangulares planas com 50 mm de comprimento (l), 15mm de largura total da chapa, (3.50mm de largura efetiva submetida ao cisalhamento, w) e 0.61mm de espessura, (t). Os ensaios foram conduzidos na máquina de ensaios INSTRON 5582 adaptada com a garra de cisalhamento, sendo esta construída de acordo com os procedimentos de Rauch^(20,21) e Fjeldly et al.⁽²²⁾ A velocidade do cabeçote da máquina de ensaios foi determinada de forma que a taxa de deformação fosse de aproximadamente $2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Para realização do cisalhamento com reversão da deformação foi adotado o seguinte procedimento:

- Cisalhamento direto, nas três direções pesquisadas, 0°, 45° e 90° DL, até nível de deformação cisalhante de 30%, ($\varepsilon_{ef} = 16.3\%$) e em seguida cisalhamento no sentido oposto até 60%, ($\varepsilon_{ef} = 32.6\%$).

Para analisar e comparar estados gerais de tensão e deformação, definiu-se as chamadas tensão e deformação efetivas mediante uso de um parâmetro, 1.84, que consiste numa estimativa da razão entre os Fatores de Taylor para diferentes solicitações. Este parâmetro, conforme demonstrado no trabalho realizado por Rauch⁽²¹⁾ no aço baixo carbono, foi o mais adequado para construção da curva de tensão efetiva em função da deformação efetiva, ao contrário dos demais estabelecidos pelos critérios de von Mises (1.73) e Tresca (2.00). Por testes semelhantes, para o aço 430E também foi escolhido o parâmetro 1.84. Com uso deste parâmetro, é possível analisar ensaios diferentes, mas com um mesmo referencial de tensão e deformação como, por exemplo, os ensaios de tração e cisalhamento. Desta forma, pode-se a partir do ensaio de cisalhamento trabalhar com a tensão e deformação efetivas para comparar as respostas de um dado material mediante solicitações diferentes. De posse dos valores de tensão e deformação cisalhantes, podem-se determinar os valores da tensão e deformação efetivas aplicando as Equações (2) e (3):

$$\sigma_{ef} = 1.84 * \tau \quad (2)$$

$$\varepsilon_{ef} = \gamma / 1.84 \quad (3)$$

onde:

σ_{ef} = tensão efetiva [MPa];

τ = tensão cisalhante [MPa];

ε_{ef} = deformação efetiva;

γ = deformação cisalhante.

Após os ensaios reversos, o comportamento mecânico exibido pelo material em função da direção foi comparado com o apresentado no cisalhamento direto, destacando aspectos de encruamento, amaciamento e/ou endurecimento e variação do alongamento uniforme. Com isto, foi analisada a influência da alteração na mudança na trajetória mediante sequência reversa na capacidade de conformabilidade do material.

Para calcular o alongamento uniforme após mudança na trajetória de deformação, assume-se que a curva $\sigma_{ef} - \varepsilon_{ef}$ do material se aproxima da equação de potência proposta pela Equação (4):

$$\sigma_{ef} = k(\varepsilon_{ef})^n \quad (4)$$

onde K é o coeficiente de resistência [MPa].

O valor do expoente de encruamento, n, foi calculado conforme demonstrado por Zandrahimi et al.,⁽²³⁾ ao afirmar que a localização da deformação

plástica irá ocorrer quando se registra $\frac{d\sigma_{ef}}{d\varepsilon_{ef}} \cdot \frac{1}{\sigma_{ef}} < 1$, que é interpretado como a taxa

de tensão trativa dividida pela taxa de trabalho.

De posse do valor do expoente de encruamento, n, a Equação (5) foi utilizada para calcular o valor do alongamento uniforme, A_u :

$$A_u = (e^n - 1) \quad (5)$$

onde: e = exponencial.

3 RESULTADOS

Na Figura 2 é apresentada a curva de tensão cisalhante em função da deformação cisalhante para as três direções pesquisadas. Pode-se observar que a anisotropia entre as direções é pequena, pelo fato de todas elas apresentarem o mesmo comportamento após a reversão da deformação. O material escoou num baixo nível de tensão, aproximadamente 200 MPa de tensão cisalhante, (Figura 2 parte A). Após reversão da deformação, praticamente não se observa estagnação da tensão, algo característico do efeito Bauschinger, mas transientes no encruamento, (Figura 2 parte B), que serão discutidos adiante.

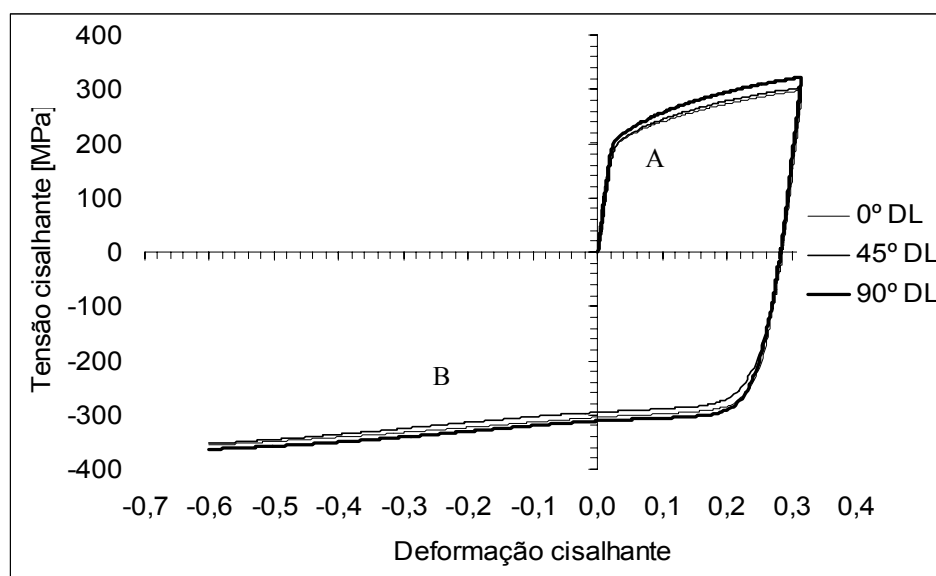


Figura 2. Curva tensão cisalhante em função da deformação cisalhante para amostra aço AISI 430E submetida ao carregamento com reversão da deformação

A Tabela 1 mostra a variação das principais propriedades mecânicas após alteração na trajetória de deformação na amostra de aço AISI 430E.

Tabela 1. Variação das propriedades mecânicas após alteração na trajetória de deformação

Direção	Propriedades Mecânicas							
	Cisalhamento direto				Cisalhamento reverso			
	σ_f [MPa]	LE[MPa]	n	A_u	LE1[MPa]	n	A_u	Variação LE1/ σ_f
0° DL	548	336	0.18041	0.19227	367	0.21849	0.24420	-33.03%
45° DL	559	356	0.17164	0.18188	375	0.22283	0.24961	-32.92%
90° DL	587	339	0.17757	0.18896	432	0.22407	0.25116	-26.40%

onde:

σ_f = tensão de fluxo máxima durante cisalhamento direto, [MPa];

LE = limite de escoamento, [MPa];

LE1 = limite de escoamento após reversão da deformação, [MPa].

As Figuras 3 a 5 estabelecem relação entre a mudança na trajetória de deformação com o encruamento do material. As curvas de tensão efetiva em função da deformação efetiva foram construídas com uso do parâmetro 1.84, descrito no item 2.2. Para permitir efeito comparativo, o eixo da deformação reversa foi invertido, Figuras 3, 4 e 5 (A).

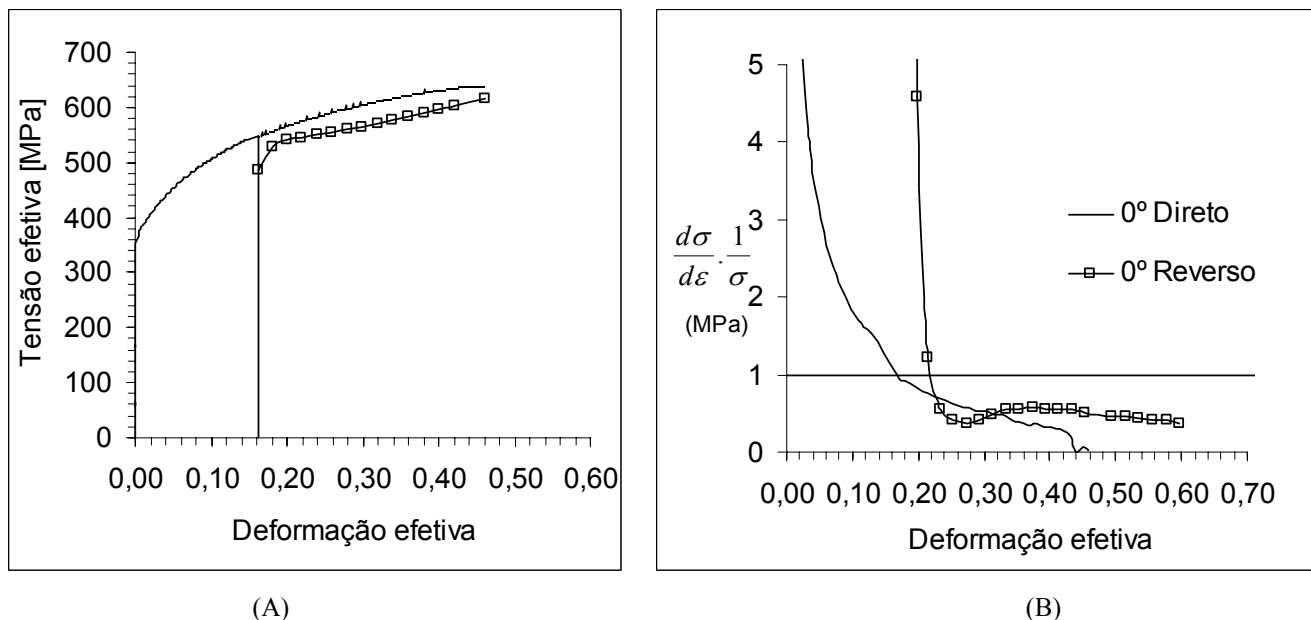


Figura 3. Comportamento mecânico da amostra de aço AISI 430E submetida à deformação reversa por cisalhamento direto e reverso: (A) Curva tensão efetiva em função da deformação efetiva, 0°DL

(B) Curva $\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \cdot \frac{1}{\sigma}$ em função da deformação efetiva, 0°DL

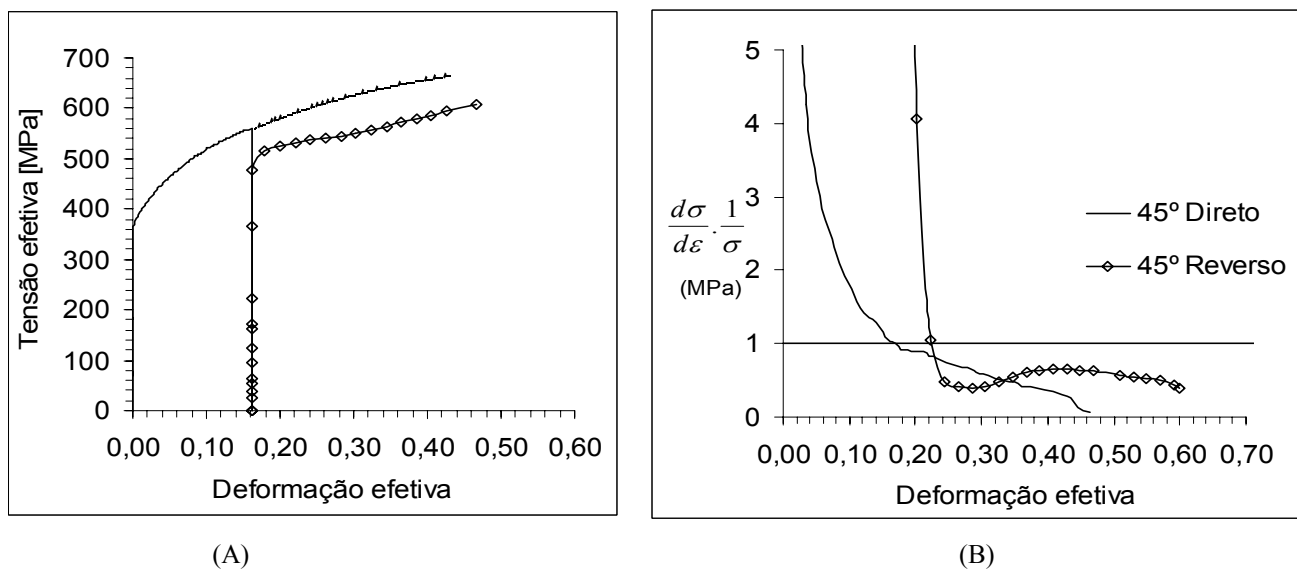


Figura 4. Comportamento mecânico da amostra de aço AISI 430E submetida à deformação reversa por cisalhamento direto e reverso: (A) Curva tensão efetiva em função da deformação efetiva, 45°DL

(B) Curva $\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \cdot \frac{1}{\sigma}$ em função da deformação efetiva, 45°DL

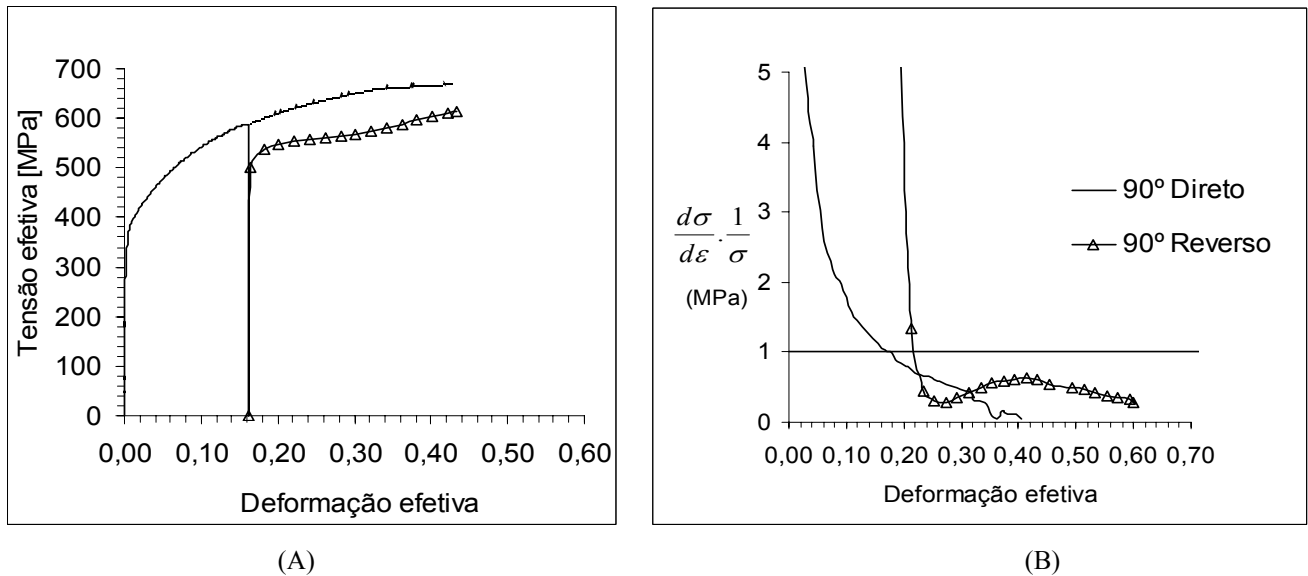


Figura 5. Comportamento mecânico da amostra de aço AISI 430E submetida à deformação reversa por cisalhamento direto e reverso: (A) Curva tensão efetiva em função da deformação efetiva, 90°DL (B) Curva $\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \cdot \frac{1}{\sigma}$ em função da deformação efetiva, 90°DL

4 DISCUSSÃO

É possível observar em todas as direções, aumento do expoente de encruamento e alongamento uniforme quando comparados com o carregamento monotônico. A direção a 0°DL apresentou o maior amaciamento com a reversão da deformação enquanto a 90°DL teve associado o menor valor. Isto ocorre devido ao fato destas direções, 0° e 90°DL, possuírem o menor e maior expoente de encruamento, respectivamente, conforme demonstrado na Tabela 1. A diminuição da tensão de recarregamento após a reversão da deformação e o aumento do encruamento inicial, favoreceram o aumento na ductilidade do material em todas as direções, como demonstrado pelos valores do alongamento uniforme, A_u , também exibidos na Tabela 1.

As Figuras 3 a 5 mostram em todas as direções, como características do Efeito Bauschinger, tensão de fluxo inicial inferior à registrada imediatamente antes da interrupção do ensaio para reversão da deformação, amaciamento permanente e encruamento inicial superior ao registrado durante o carregamento monotônico.

A variação da taxa de encruamento com a deformação mostra encruamento inicial superior quando comparado com o carregamento monotônico com posterior queda transiente na taxa de encruamento num intervalo de deformação efetiva que variou entre 0.22 a 0.32, com menor extensão a 0°DL. Com isso, apesar dessa direção ter registrado o maior amaciamento inicial, a recuperação da taxa de encruamento foi mais rápida que nas demais direções, reduzindo assim o amaciamento com o acréscimo da deformação. Porém, para o nível de deformação associado aos ensaios realizados, não houve registro de intercessão das curvas de fluxo. A alteração no encruamento após a mudança na trajetória de deformação é devido ao rearranjo das deslocamentos durante o recarregamento, segundo Wilson et al.⁽²⁴⁾

A alteração na trajetória de deformação modificou consideravelmente o comportamento mecânico do material. A mudança que ocorre na tensão de fluxo inicial depende do material e do modo da mudança na trajetória de deformação, como destacado por Zandrahimi et al.⁽²³⁾ Pela análise das Figuras 3 a 5, em todas as direções o material apresentou tensão inicial de fluxo menor, o que segundo Rauch e Thuillier,⁽²⁵⁾ pode ser explicado pelo fato de que nos testes Bauschinger, novos sistemas de escorregamento são ativados, mas no sentido oposto ao presente no primeiro modo de deformação e que a ação das paredes com elevada densidade de deslocações em restringirem o movimento das deslocações móveis será minimizada uma vez que com a reversão, as deslocações móveis poderão se mover livremente no interior dessas paredes, fazendo com que a tensão de escoamento seja reduzida, ocasionando amaciamento permanente. Já o aumento na taxa de encruamento no estágio inicial do segundo modo de deformação está relacionado com a reorientação das componentes de tensões internas geradas durante a pré-deformação, segundo Wilson et al.⁽²⁴⁾

5 CONCLUSÕES

A técnica de ensaio de cisalhamento planar simples foi executada com extrema facilidade para promover a reversão da deformação, sem apresentar os inconvenientes presentes nos tradicionais testes unidirecionais como flambagem da amostra, estricção e limitação da amplitude de deformação.

Com a reversão da deformação o material apresentou praticamente o mesmo comportamento em função da direção, com isto, pode-se afirmar que a anisotropia do material é pequena. Em todas as direções foi observada tensão de fluxo inicial inferior à tensão de fluxo imediatamente antes da interrupção do ensaio, e aumento do encruamento no estágio inicial do segundo modo de deformação, fatos estes que possibilitaram aumento na ductilidade do material após alteração na trajetória de deformação. Em seguida, foi observada redução transiente da taxa de encruamento seguido por recuperação com o acréscimo da deformação. A direção a 0°DL foi a que apresentou menor extensão de queda na taxa de encruamento, o que possibilitou sua rápida recuperação quando comparada com as demais direções.

Finalmente, o aço AISI 430E apresentou comportamento mecânico semelhante ao observado em ligas de alumínio comercialmente puras, aço baixo carbono e aço IF (Interstitial Free) além de ter associado características semelhantes aos materiais classificados como tipo 1, descrito por Chung e Wagoner,⁽¹²⁾ com tensão de fluxo inicial inferior seguida por aumento no encruamento. No entanto, deve-se ressaltar que a magnitude e a ocorrência destes fenômenos decorrem das características estruturais do metal e da sequência de deformação adotada.

Agradecimentos

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

REFERÊNCIAS

- 1 TEODOSIU, C. *Modelling of plastic deformation and its engineering applications* (Proc. 13th Riso), p. 192, 1992;
- 2 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;
- 3 BAUSCHINGER, J. *Ueber die Veränderung der Elasticitätsgrenze und des Elasticitätsmoduls verschiedener Metalle*. Civiling N.F, v.27 n. 19, p. 289-348, 1881;
- 4 PEETERS, B., KALIDINDI, S. R., TEODOSIU, C., HOUTTE, P.V.; AERNOULDT, E. *A theoretical investigation of the influence of dislocation sheets on evolution of yield surfaces in single-phase B.C.C. polycrystals*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, v.50, p. 783-807, 2002;
- 5 SCHMITT, J.H., AERNOULDT, E.; BAUDELET, B. *Yield loci for polycrystalline metals without texture*. Materials Science & Engineering, v.75, p. 13-20, 1985;
- 6 SCHMITT, J.H. *Contribution à l'étude de la micro-macroplasticité des aciers, (in French)*. Tese de doutorado apresentada ao Inst. National Polytechnique, Grenoble, França, 1986;
- 7 DIETER, G.E. *Deformação plástica dos Monocristais*. In: *Metalurgia Mecânica*, 2^a ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan S.A., 1981, cap. 4, p. 125-126;
- 8 CHOTEAU, M., QUAEGEBEUR, P.; DEGALLAIX, S. *Modelling of Bauschinger effect by various constitutive relations derived from thermodynamical formulation*. Mechanics of Materials, v.37, p. 1143-1152. 2005;
- 9 ROLFE, S.T., HAAK, R.P.; GROSS, J.H. Trans. Amer. Soc. Mech. Eng., J. Basic Eng., v.90, p. 403-408, 1968;
- 10 POLAKOWSKI, N.H. ASTM, Proc., v.63, p. 535, 1963;
- 11 BACROIX, B., GENEVOIS, P.; TEODOSIU, C. *Plastic anisotropy in low carbon steels subjected to simple shear with strain path changes*. European J. Mech.Ser. A/Solids, v.13, p. 661-675, 1994;
- 12 CHUNG, K.; WAGONER, R.H. *Effect of stress-strain-law transients on formability*. Metallurgical Transactions, v.17A, p. 1001-1009, June, 1986;
- 13 GENG, L.; WAGONER, R.H. *Role of plastic anisotropy and its evolution on springback*. Int. J. Mech.Sci. v.44, p. 123-148, 2002;
- 14 LI, K.P., CARDEN, W.P.; WAGONER, R.H. *Simulation of springback*. Int. J. Mech. Sci. v.44, p. 103-122, 2002;
- 15 LEE, M.G., KIM, D., KIM, C., WENNER, M.L., WAGONER, R.H.; CHUNG, K. *Spring-back evaluation of automotive sheets based on isotropic-kinematic hardening laws and non-quadratic anisotropic yield function. Part II: characterization of material properties*. International Journal of Plasticity, v.21, p. 883-914, 2005;
- 16 BOGER, R.K., WAGONER, R.H., BARLAT, F.; LEE, M.G. *Continuos, large strain, tension/compression testing of sheet material*. International Journal of Plasticity, v.21, p. 2319-2343, 2005;
- 17 RAUCH, E.F.; SCHMITT, J.H. *Dislocation substructures in mild steel deformed in simple shear*. Materials Science Engineering, v.113A, p. 441-448, 1989;
- 18 HU, Z. *Work-hardening behavior of mild steel under cyclic deformation at finite strains*. Acta Metallurgica Materialia, v.42, p. 3481-3491, 1994;
- 19 HU, Z., RAUCH, E.F.; TEODOSIU, C. International Journal of Plasticity, v.8, p. 839-859, 1992;

- 20 RAUCH, E.F. *Plastic anisotropy of sheet metals determined by simple shear tests*. Materials Science Engineering, v.241A, p. 179-183, 1998;
- 21 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;
- 22 FJELDLY, A., ROVEN, H.J.; RAUCH, E.F. *Shear deformation properties of extruded AlZnMg alloys*. Scripta Materialia, v.38, p. 709-714, 1998;
- 23 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.
- 24 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;
- 25 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.