

EFEITO DO VALOR DA PRÉ-DEFORMAÇÃO EM CISALHAMENTO NA DEFORMAÇÃO CÍCLICA DE UM AÇO COM BAIXO TEOR DE CARBONO E DE UM LATÃO¹

Wellington Lopes²
Elaine Carballo Siqueira Corrêa³
Haroldo Béria Campos⁴
Maria Teresa Paulino Aguilár⁵
Paulo Roberto Cetlin⁶

Resumo

Este trabalho estuda o efeito da quantidade de pré-deformação em cisalhamento no comportamento mecânico de um aço com baixo teor de carbono e do latão CuZn34 deformados ciclicamente com uso da técnica de cisalhamento planar simples. Os resultados obtidos indicaram que a ocorrência de fenômenos tais como a saturação (estagnação) da tensão, endurecimento ou amaciamento cíclicos dependem principalmente das características estruturais dos materiais e do valor da pré-deformação. Por fim, o comportamento mecânico detectado foi correlacionado com a provável evolução subestrutural dos dois metais.

Palavras-chave: Deformação cíclica; Cisalhamento planar simples; Aço com baixo teor de carbono; Latão.

EFFECT OF SHEAR PRESTRAIN ON THE CYCLIC DEFORMATION OF A LOW CARBON STEEL AND OF A BRASS

Abstract

This paper studies the effect of the amount of shear prestraining on the mechanical behaviour of a low carbon steel and of the CuZn34 brass cyclically deformed through the planar simple shear technique. The results obtained indicated that the occurrence of phenomena such as the saturation (stagnation) stress and the cyclic hardening or softening depend mainly on the structural characteristics of the materials and on the prestrain value. Finally, the mechanical behaviour detected was correlated with the probable substructural evolution of the two metals.

Key words: Cyclic deformation; Planar simple shear; Low carbon steel; Brass.

¹ Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil

² Aluno de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da UFMG, wellingtonlopes2003@ig.com.br.

³ Doutora, UFMG, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

⁴ Professor Associado, UFMG, Departamento de Engenharia Mecânica.

⁵ Professora Associada, UFMG, Departamento de Engenharia de Materiais e da Construção Civil.

⁶ Professor Titular, UFMG, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1 INTRODUÇÃO

Uma operação de conformação mecânica que emprega esforços cíclicos pode ser caracterizada como sendo aquela que submete um material à aplicação de cargas repetitivas e alternadas para alcançar a forma e as dimensões finais do produto. A Figura 1 mostra como exemplo, uma operação de conformação de chapas (embutimento profundo), onde há a presença de cargas cíclicas. O metal é dobrado/desdobrado no início e no final da entrada do material na parede do copo.⁽¹⁾

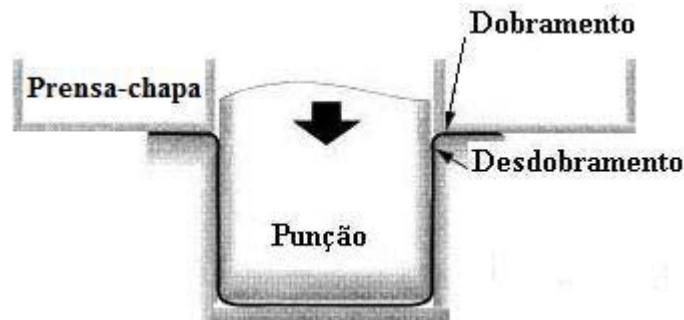


Figura 1. Esquema do processo de embutimento profundo com aplicação de cargas em sentidos opostos ocasionando o dobramento/desdobramento da chapa.

Os materiais deformados ciclicamente exibem um comportamento mecânico atípico, decorrente da variação (evolução) do encruamento com a deformação plástica. O metal pode endurecer, amaciar ou até mesmo permanecer estável em função de suas características estruturais, da história de deformação (como recebido ou deformado previamente) e da amplitude da deformação cíclica.⁽²⁾ Dependendo do estado do material e dos parâmetros do carregamento cíclico, o material pode até mesmo apresentar as três características.⁽³⁾

Coffin e Tavernelli⁽⁴⁾ verificaram que o amaciamento ou o endurecimento de diversos materiais após a aplicação de esforços cíclicos mediante ensaios do tipo tração/compressão era função da condição inicial dos mesmos: pré-deformado ou recozido. Para a primeira condição houve amaciamento, já quando recozido, verificou-se endurecimento. Entretanto, foi constatado que a ocorrência desses fenômenos dependia principalmente da maneira pela qual o metal é deformado (trajetória ou caminho de deformação) e da amplitude da deformação cíclica.

A trajetória de deformação pode ser classificada como proporcional e não-proporcional. No primeiro caso, a razão entre as deformações principais e a tensão cisalhante máxima é constante durante o carregamento. Deste modo, em carregamentos uniaxiais como tração, o escorregamento das deslocações ocorre nos mesmos planos cristalográficos e o encruamento é menor que o observado em seqüências não-proporcionais.⁽²⁾ Nesse tipo de carregamento, presente, por exemplo, em seqüências de processamento onde há uma variação de 90° na direção dos esforços aplicados, a direção da tensão cisalhante máxima e as componentes das deformações mudam durante a deformação cíclica. Assim, haverá um aumento da densidade das deslocações e do número de deslocações que se interceptam proporcionando ao material um encruamento adicional.⁽²⁾

Para estudar o efeito da história de deformação e da amplitude de deformação no encruamento de um material, Tanaka Murakami e Ooka⁽⁵⁾ deformaram o aço inoxidável 316 com uso de elevada amplitude de deformação cíclica até o ponto onde a tensão mantinha-se praticamente constante e depois

reduziram o valor da amplitude para só então prosseguir com o ensaio. Os pesquisadores observaram que os ciclos prévios de deformação cíclica com amplitude elevada influenciaram o comportamento subsequente do material. Além disso, verificou-se a presença de outra característica comum aos carregamentos cíclicos: a saturação da tensão após um determinado número de ciclos. Coffin e Tavernelli⁽⁴⁾ haviam observado este fenômeno após a deformação cíclica de vários metais mediante ensaios de tração/compressão. No entanto, pouco se sabe sobre essa estagnação transiente da taxa de encruamento que resulta numa região plana da curva tensão/deformação em decorrência do amaciamento por deformação. Como regra geral, admite-se que a extensão dessa estagnação depende do valor da pré-deformação e da amplitude de deformação cíclica. Além disso, a tensão de saturação diminui quando a amplitude é reduzida.⁽⁶⁾ No entanto, Sarma e Padmanabhan⁽⁷⁾ verificaram que independentemente da amplitude de deformação cíclica utilizada, ocorria estagnação na taxa de encruamento para o aço com médio teor de carbono. Neste caso, apenas o amaciamento ou o endurecimento do material eram sensíveis à amplitude de deformação cíclica.

Deste modo, passou-se a considerar que este fenômeno estaria correlacionado com a dissolução da subestrutura do material após a reversão da deformação. Contudo, os trabalhos desenvolvidos por Rauch et al.⁽⁸⁾ e Vincze et al.⁽⁹⁾ indicaram que aspectos estruturais tais como a desintegração das células de deslocamentos não são responsáveis, mas meramente correlacionados com a estagnação da taxa de encruamento. Segundo esses autores, a natureza das deslocamentos geradas durante a pré-deformação e a evolução estrutural das mesmas durante o recarregamento, constituem os processos físicos relacionados com a saturação da tensão.

A dificuldade para identificar as variáveis que afetam fenômenos como a saturação da tensão e o amaciamento ou o endurecimento cíclico de um material demonstra a necessidade de pesquisas adicionais. Este trabalho pretende avaliar o efeito da história de deformação, com uso de dois valores de pré-deformação em cisalhamento: 10% e 30%, em dois materiais com características estruturais diferentes: um aço com baixo teor de carbono e um latão (liga C-268), com a utilização da técnica de cisalhamento planar simples.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

A composição química do aço com baixo teor de carbono e do latão CuZn34 (latão amarelo, liga C-268) é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1: Composição química (% em peso) das chapas de aço com baixo teor de carbono e do latão.

	Aço		Latão
C	0,052	Cu	65,75
Mn	0,316	Zn	34,19
P	0,015	Pb	0,010
S	0,015	Fe	0,025
Si	< 0,05		

A espessura das chapas de aço e de latão foi de 0,60mm e de 0,51mm, respectivamente. O aço foi utilizado no estado como recebido com dureza de 106±5 HV. A chapa de latão possui a designação padrão O82 (antigo padrão ½ duro) e foi

encruada previamente. Assim, deve-se considerar que a resistência mecânica inicial, indicada pelo valor de dureza, 130 ± 2 HV, é superior ao comumente observado para o latão recozido.

A escolha destes materiais foi feita por apresentarem propriedades de encruamento distintas, fato este associado às suas características estruturais. O aço com baixo teor de carbono apresenta estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC). Portanto, é um metal susceptível à ocorrência de deslizamento cruzado durante a deformação plástica, o que levaria ao desenvolvimento de taxas de encruamento relativamente baixas durante o processamento a frio. Já o latão apresenta estrutura cristalina cúbica de faces centradas (CFC) e baixa energia de falha de empilhamento (EDE) conduzindo ao comportamento oposto ao observado para o aço em relação ao mecanismo de deslizamento. Desta forma, segundo as teorias de encruamento clássicas, o latão tende a desenvolver taxas de encruamento mais elevadas quando deformado monotonicamente.

Corrêa et al.⁽¹⁰⁾ observaram este fenômeno em curvas tensão efetiva/deformação efetiva obtidas em testes de tração para o aço e para o latão (materiais similares aos utilizados neste trabalho, mas com composição química diferente). No entanto, ao avaliar as curvas tensão efetiva/deformação efetiva determinadas a partir de ensaios de torção monotônica, o referido fenômeno não é acentuado, sugerindo que, embora o carregamento fosse monotônico, houve uma influência do modo de deformação no comportamento mecânico (subestrutural) dos metais.

2.2 Corpo de Prova

As chapas do aço com baixo teor de carbono e do latão foram cortadas na direção de laminação, DL, para confecção dos corpos de prova retangulares para cisalhamento planar simples com 50mm de comprimento (L) e 15mm de largura total (w) sendo 3,50mm de largura efetiva submetida ao cisalhamento. A Figura 2 mostra o esquema do corpo de prova para cisalhamento utilizado nos ensaios.

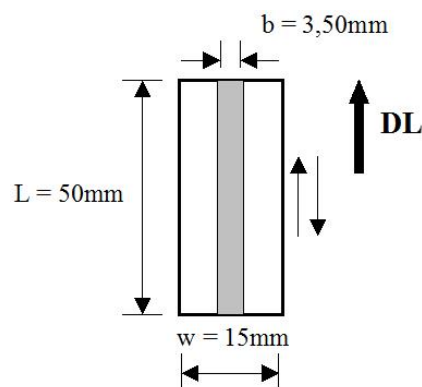


Figura 2. Esquema do corpo de prova para cisalhamento monotônico: as setas duplas indicam os sentidos do cisalhamento.

2.3 Cisalhamento Cíclico

O carregamento cíclico do aço e do latão foi conduzido na máquina de ensaios INSTRON 5582 adaptada com um dispositivo para ensaio de cisalhamento planar simples. A garra de cisalhamento usada neste trabalho foi apresentada por

Lopes et al.⁽¹¹⁾ e construída de acordo com os procedimentos descritos por Rauch^(6,12) e Fjeldly, Roven e Rauch.⁽¹³⁾

A velocidade do cabeçote da máquina de ensaios foi calculada para obtenção de um valor de taxa de deformação de $2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. A seqüência de deformação (trajetória de deformação) aplicada aos dois materiais compreendeu a combinação de cisalhamentos diretos e reversos de acordo com as seguintes etapas:

(a) pré-deformação em cisalhamento de 5% e de 25% mediante cisalhamento direto;

(b) após a pré-deformação, ambos os materiais foram submetidos a um cisalhamento adicional (cisalhamento direto) de 5% de deformação cisalhante antes de iniciar o carregamento cíclico, totalizando assim, uma pré-deformação total de 10% e de 30%, Figura 3(a);

(c) após o pré-cisalhamento, os materiais foram deformados ciclicamente mediante a combinação de cisalhamento reverso (até -5%) seguido por cisalhamento direto até 5% de deformação cisalhante. O carregamento cíclico foi executado com amplitude de deformação cisalhante cíclica $\Delta\gamma$, de 10% ou 5,4% de amplitude de deformação efetiva $\Delta\varepsilon_{\text{efet}}$, durante três ciclos, Figura 3(b).

A conversão da tensão e da deformação cisalhantes em tensão e deformação efetivas foi feita de acordo com as Equações (1) e (2):⁽⁶⁾

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

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

onde:

σ_{efet} = tensão efetiva [MPa]

τ = tensão cisalhante [MPa];

$\varepsilon_{\text{efet}}$ = deformação efetiva.

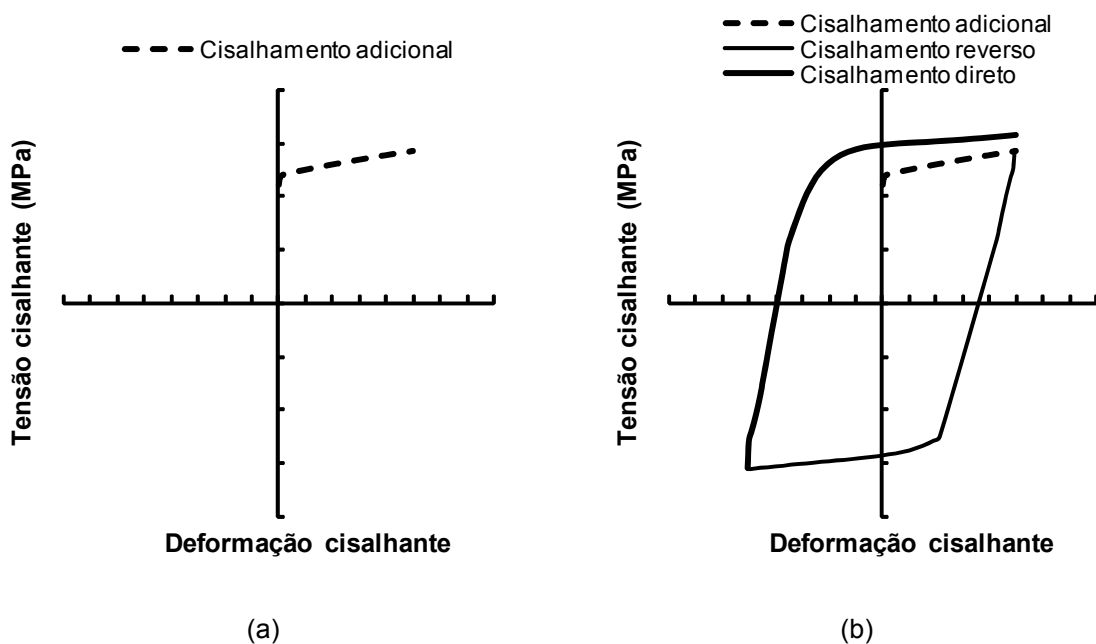


Figura 3. Curvas tensão cisalhante/deformação durante carregamento cisalhante cíclico: (a) pré-cisalhamento e (b) cisalhamento direto e reverso para o 1º ciclo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 mostra as curvas de fluxo (tensão cisalhante/deformação cisalhante) para o aço com baixo teor de carbono e para o latão. O ensaio de cisalhamento permitiu que os materiais fossem deformados plasticamente até um valor de $\gamma = 1,0$ ou $\varepsilon = 0,54$ sem apresentar a localização da deformação plástica (estricção), comum nos ensaios de tração uniaxial tradicionais. As curvas confirmam que o latão estava encruado antes do início dos ensaios mecânicos, pois a sua resistência ao escoamento foi maior que a do aço. Deste modo, o limite de escoamento deste material foi maior que o do aço. No entanto, deve-se considerar ainda o efeito do modo de deformação. Sabe-se, por exemplo, que o latão apresenta encruamento superior em compressão que em tração⁽¹⁴⁾ De maneira semelhante, Corrêa et al.⁽¹⁰⁾ observaram que o latão 70-30 apresentou comportamento mecânico diferenciado quando deformado monotonicamente em tração e em torção.

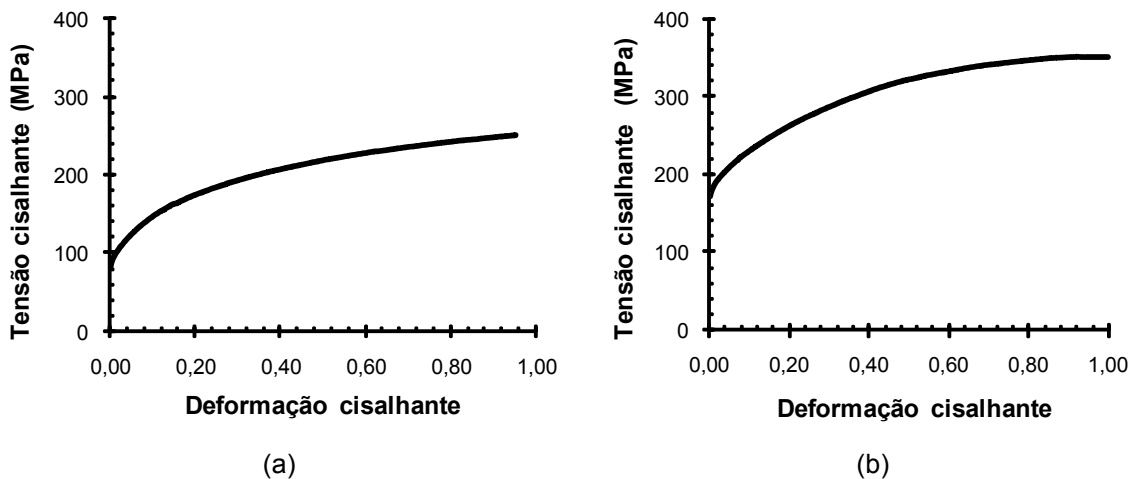


Figura 4. Curvas de fluxo (tensão cisalhante/deformação cisalhante): (a) aço com baixo teor de carbono e (b) latão.

A Figura 5 mostra as curvas tensão cisalhante/deformação cisalhante para o aço com baixo teor de carbono e para o latão pré-deformados em cisalhamento de 10% e em seguida, submetidos ao carregamento cíclico ($\Delta\gamma$ igual a 10%) durante 3 ciclos.

O aço apresentou encruamento crescente durante o pré-cisalhamento para em seguida exibir uma região plana na curva tensão/deformação. Essa saturação está representada na Figura 5 pelos valores de tensão constante para uma faixa de deformação cisalhante. Pode-se observar que para o aço, esta estagnação da tensão ocorreu durante os cisalhamentos reverso e direto, desde o primeiro ciclo. O surgimento desse fenômeno é comumente explicado em termos da evolução da microestrutura e da textura ao longo do processamento.

Embora nenhuma dessas variáveis tenha sido analisada neste trabalho, pode-se relacionar o comportamento mecânico macroscópico detectado com a provável evolução das mesmas. A textura já foi considerada uma das principais influências do encruamento após mudanças no modo de deformação de um material.⁽¹⁵⁾ Contudo, um trabalho recente mostra que a modificação da densidade das deslocamentos tem um efeito mais forte.⁽¹⁶⁾ Deste modo, o efeito da textura cristalográfica no comportamento mecânico dos materiais pesquisados não será considerada neste trabalho.

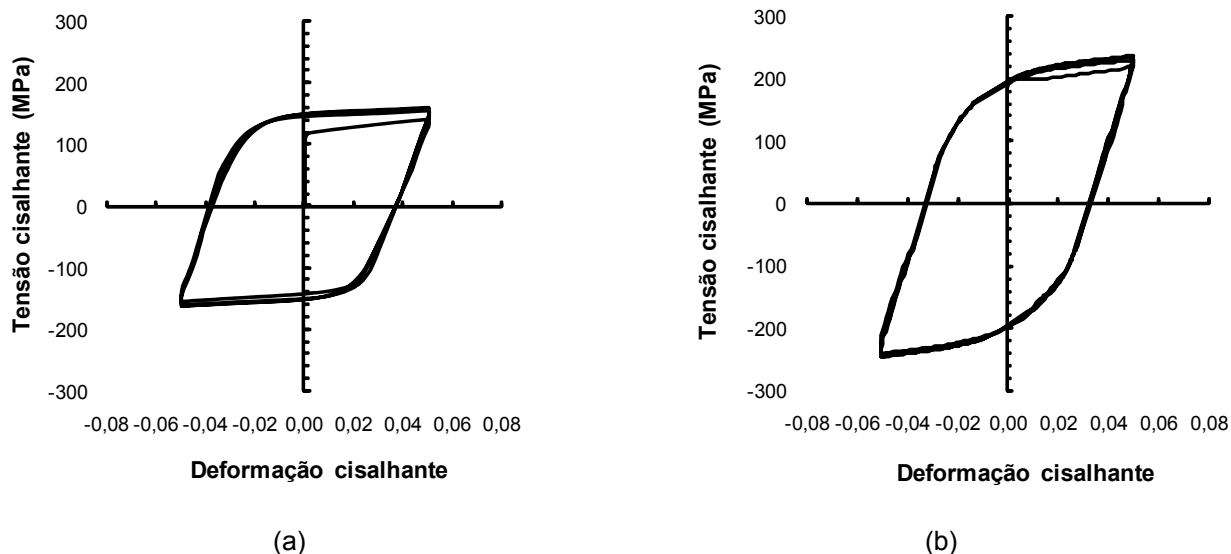


Figura 5. Curvas tensão cisalhante/deformação cisalhante após pré-deformação em cisalhamento de 10%: (a) aço com baixo teor de carbono e (b) latão.

Aços com baixo teor de carbono, como o utilizado neste trabalho, são caracterizados por terem estrutura cristalina CCC e serem susceptíveis ao escorregamento cruzado. Assim, quando estes materiais são deformados monotonicamente, uma estrutura celular de deslocações normalmente se desenvolve. No entanto, esse tipo de estrutura de deslocações é instável após a inversão do sentido de deformação.⁽¹⁰⁾

A deformação cíclica desorganiza e rearranja a estrutura das deslocações que se formou durante o carregamento monotônico (neste caso, a pré-deformação), provocando a aniquilação das deslocações e conseqüentemente, uma redução da densidade das mesmas. Esses efeitos ocasionam a saturação da tensão com o posterior amaciamento do material.

Para o latão, o fenômeno da saturação da tensão não é nítido como para o aço, sugerindo que a estrutura de deslocações criada na pré-deformação é mais resistente à deformação reversa. De fato, metais como o latão, com estrutura cristalina CFC e baixa energia de falha de empilhamento, tendem a desenvolver um arranjo planar de deslocações e não celular como observado para os metais CCC.⁽¹⁰⁾ Esse tipo de estrutura cristalina é menos propenso ao escorregamento cruzado. Assim, a saturação da tensão é mais difícil para o latão que para o aço.

A Figura 6, assim como a Figura 5, mostra as curvas tensão cisalhante/deformação cisalhante para o carregamento cíclico do aço com baixo teor de carbono e do latão, mas com um valor de pré-deformação em cisalhamento maior, 30% (25% + 5%) e com o mesmo valor de amplitude de deformação cíclica $\Delta\gamma$, 10%, durante 3 ciclos.

Nesta condição, ambos os materiais apresentaram amaciamento cíclico. No entanto, como o valor da pré-deformação foi maior, antes de amaciar, os dois materiais exibiram uma tensão de escoamento inicial maior, se comparada com a pré-deformação de 10%, para em seguida amaciarem com a deformação cíclica. Pode-se afirmar que o encruamento adicional dos materiais ocorreu porque o valor da pré-deformação foi maior, permitindo assim, o aumento da densidade de deslocações.

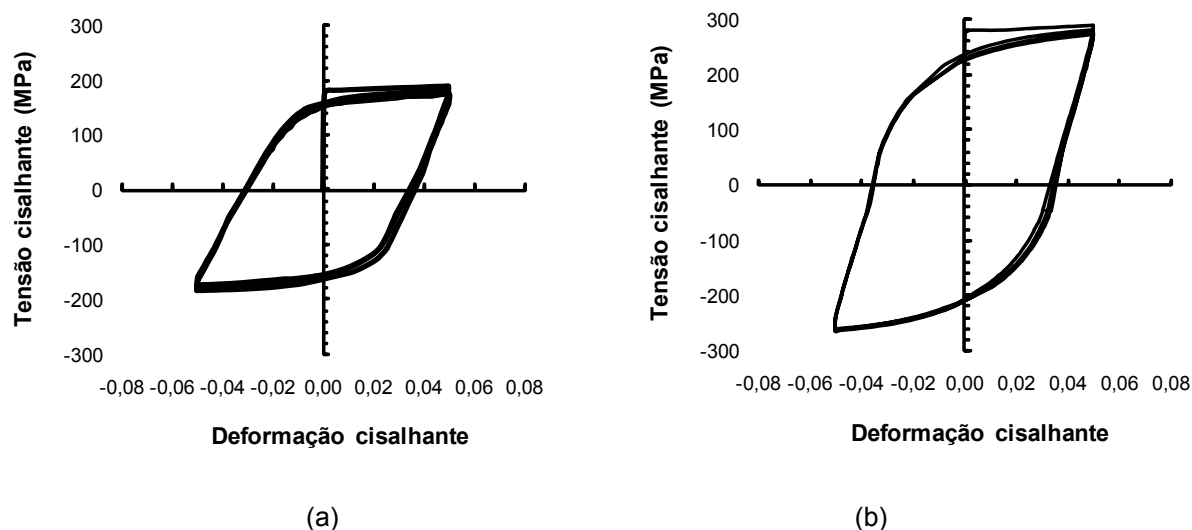


Figura 6. Curvas tensão cisalhante/deformação cisalhante após pré-deformação em cisalhamento de 30%: (a) aço com baixo teor de carbono e (b) latão.

A intensidade do amaciamento foi diferente para cada um dos materiais. A saturação da tensão foi observada novamente para o aço. Pelo fato da saturação da tensão não ter sido identificada claramente para o latão, pode-se concluir que a estrutura de deslocamentos desenvolvida durante a pré-deformação do aço continuou sendo menos resistente à deformação reversa que a do latão.

A Figura 7 mostra os valores da tensão cisalhante média de cada ciclo (média da tensão cisalhante máxima durante os carregamentos reverso e direto) em função do número de ciclos e da quantidade de pré-deformação, para o aço (Figura 7a) e para o latão (Figura 7b). Para a construção desta figura, todos os valores de tensão foram considerados positivos. Pode-se observar que a tensão de saturação média $\Delta\sigma$, aumentou com o valor da pré-deformação, para ambos os materiais. No entanto, para um mesmo valor de pré-deformação, a tensão cisalhante média de um ciclo ao outro aumentou ou diminuiu se houve endurecimento ou amaciamento cíclico, respectivamente. Assim, como para o valor de pré-deformação de 10% houve endurecimento cíclico, a tensão cisalhante média aumentou ciclo após ciclo sendo observado o oposto para o outro valor de pré-deformação.

Através da análise das Figuras 5 e 6 não foi possível observar claramente a saturação da tensão para o latão. Contudo, a Figura 7b mostra que a variação da tensão cisalhante média durante os 3 ciclos e para os dois valores de pré-deformação, foi pequena para o latão. Isso indica que a saturação da tensão pode ter iniciado para o latão, embora ela não seja evidente quando avaliada através das curvas tensão cisalhante/deformação cisalhante. No entanto, deve-se considerar que os valores de tensão cisalhante média foram calculados através da média da tensão máxima obtida em cada um dos estágios do carregamento cíclico. Assim, embora o aço também tenha apresentado variação pequena da tensão entre os três ciclos, os valores da tensão mantiveram-se praticamente constantes durante todo o carregamento cíclico e não apenas ao final dos mesmos.

Os resultados sugerem que a ocorrência do fenômeno de saturação da tensão mediante carregamento cíclico para o aço e para o latão dependeu

principalmente da quantidade de pré-deformação enquanto a magnitude desse efeito, das características estruturais do material.

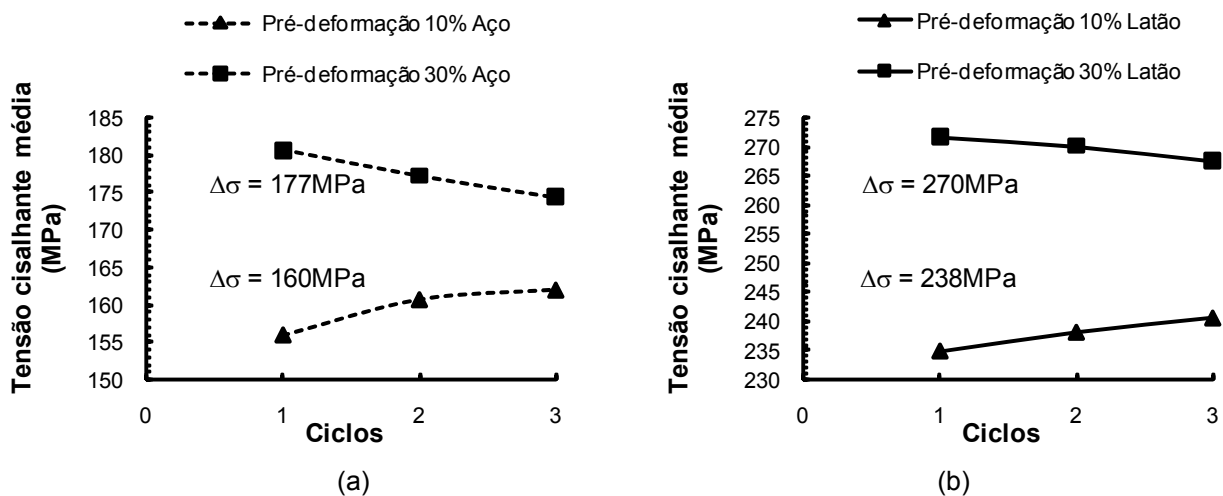


Figura 7. Valores da tensão cisalhante média em função do número de ciclo e do valor da pré-deformação em cisalhamento: (a) aço com baixo teor de carbono e (b) latão.

4 CONCLUSÕES

- A deformação cíclica do aço com baixo teor de carbono e do latão (liga C-268) mediante cisalhamentos reverso e direto promoveu o endurecimento ou o amaciamento cíclicos em função da quantidade de pré-deformação em cisalhamento;
- Para o valor de pré-deformação cisalhante de 10% houve endurecimento cíclico para os dois materiais, sendo observado um estado de saturação da tensão para o aço;
- Para a pré-deformação em cisalhamento de 30% ocorreu amaciamento cíclico para ambos os metais. Para o aço, a saturação da tensão foi novamente identificada. Já para o latão, esse fenômeno não é evidente;
- Para um mesmo valor de pré-deformação, o comportamento mecânico do latão foi mais estável que para o aço.

Agradecimentos

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

REFERÊNCIAS

- 1 F. YOSHIDA, T. UEMORI E K. FUJIWARA. *Elastic-plastic behavior of steel sheets under in-plane cyclic tension-compression at large strain*. International Journal of Plasticity, v.18, p 633-659, (2002);
- 2 COLAK, O.U. *A viscoplasticity theory applied to proportional and non-proportional cyclic loading at small strains*. International Journal of Plasticity, v. 20, p. 1387-1401, (2004);
- 3 SILVA JR, A.R., OLIVEIRA, D.S.L., BAPTISTA, C.A.R.P., BARBOZA, M.J.R.; TORRES, M.A.S. *Estudo do comportamento em fadiga oligocíclica da liga Ti-13V-11Cr-3Al*. Revista Matéria, v.9 (4), p. 305-314, (2004);

- 4 COFFIN, L.F.; TAVERNELLI, J.F. *The cyclic straining and fatigue of metals*. Transactions of Metallurgical Society of AIME, v.215, p. 794-807, October, (1959);
- 5 TANAKA, E., MURAKAMI, S.; Ōoka, M. *Effects of plastic strain amplitude on non-proportional cyclic plasticity*. Acta Mechanica, v. 57, p. 167-182, (1985);
- 6 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);
- 7 SARMA, V.S.; PADMANABHAN, K. *Transmission Electron Microscopy of a cyclically deformed medium carbon microalloyed steel*. Journal of Materials Science Letters, v.16, p. 1495-1498, (1997);
- 8 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;
- 9 VINCZE, G., RAUCH, E.F., GRACIO, J.J., BARLAT, F.; LOPES, A.B. *A comparasion of the mechanical behavior of an AA1050 and a low carbon steel deformed upon strain reversal*. Acta Materialia, v.53, p. 1005-1013, (2005);
- 10 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);
- 11 LOPES, W., CORRÊA, E.C.S., CAMPOS, H.B., AGUILAR, M.T.P., CETLIN, P.R. *Efeito da deformação reversa no comportamento mecânico do aço inoxidável AISI 430*. In: 61º Congresso Anual da ABM, 2006, Rio de Janeiro/RJ. Anais do 61º Congresso Anual da ABM, Rio de Janeiro/RJ: ABM, p. 1459-1469, (2006);
- 12 RAUCH, E.F. *Plastic anisotropy of sheet metals determined by simple shear tests*. Materials Science Engineering, v.241A, p. 179-183, (1998);
- 13 FJELDLY, A., ROVEN, H.J.; RAUCH, E.F. *Shear deformation properties of extruded AlZnMg alloys*. Scripta Materialia, v.38, p. 709-714, (1998);
- 14 Properties and Selection: Irons Steels, and High Performance Alloys. 3 ed. Ohio: American Society for Metal – ASM International, v.1, 2521p, (1993);
- 15 TOTH, L.S., GILORMINI, P., JONAS, J.J. *Effect of rate sensitivity on the stability of torsion textures*. Acta Metallurgica, v.36 (12), p. 3077-3091, (1988);
- 16 RAUCH, E.F., GRACIO, J.J., BARLAT, F. *Work-hardening model for polycrystalline metals under strain reversal at large strains*. Acta Materialia, v.55, p. 2939-2948, (2007).