



ESTUDO DO ENCRUAMENTO ANISOTRÓPICO DO LATÃO CuZn34 SOB CARREGAMENTO BAUSCHINGER¹

Wellington Lopes²

Elaine Carballo Siqueira Corrêa³

Haroldo Béria Campos⁴

Maria Teresa Paulino Aguiar⁵

Paulo Roberto Cetlin⁶

Resumo

O estudo dos carregamentos com inversão do sentido da deformação plástica (carregamentos Bauschinger) é comumente realizado como exemplo de uma sequência de carregamento caracterizada pela ocorrência de um encruamento não-usual, isto é, anisotrópico (cinemático) dos materiais. Considerando isso, este trabalho descreve o carregamento Bauschinger do latão CuZn34 na condição pré-encruado (como recebido) e recozido em termos de parâmetros relacionados com a tensão (β_σ) e com a deformação (β_ϵ), além de características físicas, como a tensão interna (*back stress*, σ_{int}) e a tensão efetiva (σ_{eff}). Os resultados confirmam a condição de encruamento anisotrópico desse material sob carregamento Bauschinger, além da influência do estado inicial do material na intensidade desse tipo de comportamento mecânico.

Palavras-chave: Trajetória de deformação; Aço de baixo teor de carbono; Latão; Método de elementos finitos.

STUDY OF THE ANISOTROPIC WORK-HARDENING OF THE CuZn 34 BRASS UNDER BAUSCHINGER LOADING

Abstract

The study of the reversed strain loadings (Bauschinger loading) is commonly presented as an example of a loading sequence with anisotropic (kinematic) work-hardening of the materials. Considering this, this paper describes the Bauschinger loading of CuZn34 brass pre-worked (as-received) and annealed in terms of parameters associated with the stress (β_σ) and with the strain (β_ϵ), beside physics characteristics such as the back stress (σ_{int}) and the effective stress (σ_{eff}). The results confirm the anisotropic condition of this material under Bauschinger loading and moreover, the influence of the initial state of the CuZn34 on the intensity of this mechanical behavior.

Key words: Strain path; Bauschinger effect; Brass; Kinematic work-hardening.

¹ Contribuição técnica ao 65° Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Professor, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerai – CEFET-MG, Campus VII, Timóteo/MG, Departamento de Mecânica e Metalurgia, wellingtonlopes@deii.cefetmg.br.

³ Professor, Departamento de Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG.

⁴ Professor, UFMG, Departamento de Engenharia Mecânica.

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

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

1 INTRODUÇÃO

Os carregamentos com inversão do sentido de deformação plástica, conhecidos como carregamentos Bauschinger são caracterizados por apresentarem uma redução da tensão de fluxo após a inversão do sentido da deformação plástica.⁽¹⁾ A intensidade dessa mudança do comportamento mecânico do material após a alteração do caminho de deformação depende da quantidade de pré-deformação, da temperatura, da textura cristalográfica, da própria trajetória de deformação (sequência de carregamento usada para inverter o sentido da deformação) que afeta o estado de tensões aplicado ao material, dentre outras variáveis.

A Figura 1 mostra a curva tensão-deformação de um material com a identificação do efeito Bauschinger após a mudança na trajetória de deformação (carregamento-descarregamento). Nesta figura percebe-se que a tensão de fluxo no início do recarregamento no sentido inverso (σ_r) é menor que a tensão de fluxo alcançada ao final do carregamento (σ_f), sendo esse fenômeno conhecido como efeito Bauschinger.⁽¹⁾ Neste caso, o encruamento do material é anisotrópico ou cinemático. Caso contrário, ou seja, sendo σ_y e σ_r , o material não exhibe efeito Bauschinger e o encruamento é isotrópico.

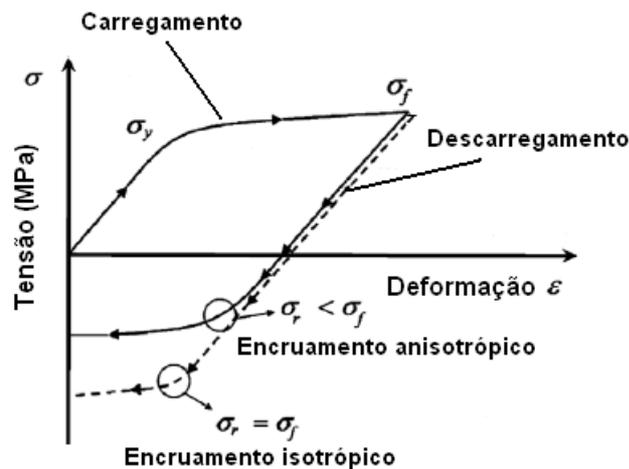


Figura 1. Curva tensão – deformação com a indicação do efeito Bauschinger de um material metálico, devido à ocorrência do encruamento anisotrópico (cinemático).⁽¹⁾

A consideração do encruamento cinemático é um requisito necessário à descrição do comportamento mecânico dos materiais em situações de deformação plástica complexas que utilizam técnicas de simulação numérica por elementos finitos.⁽²⁾ Contudo, essa abordagem, embora seja importante, ainda é pouco utilizada porque não se conhece claramente todos os efeitos das variáveis (modo de carregamento mecânico, estado inicial do material, dentre outras) que afetam o encruamento dos materiais metálicos após mudanças na trajetória de deformação.

Deste modo, uma alternativa consiste em adotar o uso do encruamento isotrópico em diversas rotas de carregamento mecânico, como as sequências Bauschinger (tração-compressão, compressão-tração, cisalhamento direto-cisalhamento reverso).⁽³⁾

No entanto, a descrição incorreta do encruamento de um metal sob carregamento do tipo Bauschinger ocasiona uma caracterização inadequada de alguns fenômenos, como a previsão do retorno parcial do material após a retirada do

esforço mecânico, necessário, por exemplo, ao dobramento de uma chapa (Figura 2).

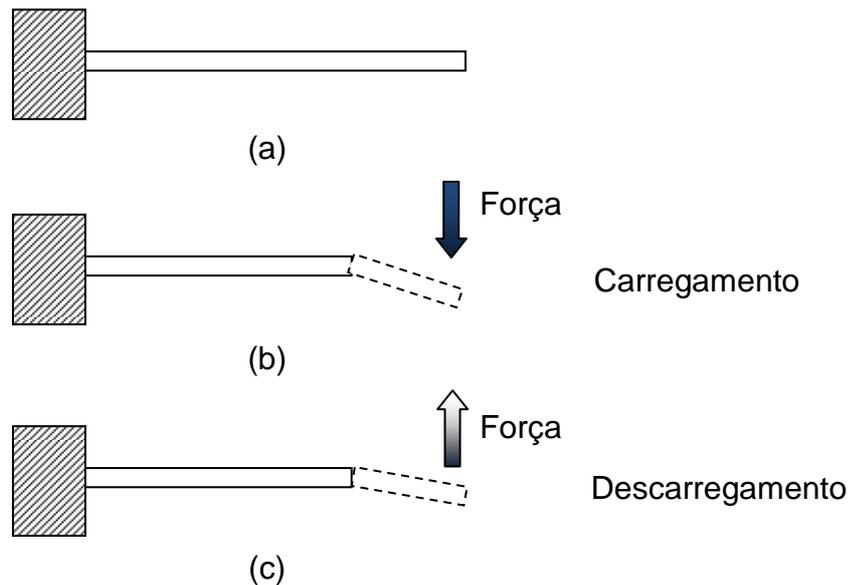


Figura 2. Esquema do dobramento de uma chapa: (a) chapa sem a aplicação da força de dobramento, (b) chapa dobrada e (c) retirada da força de dobramento da chapa e retorno parcial do material à posição original.

Quando se considera que o encruamento do material sob carregamento Bauschinger seja cinemático, o retorno que o mesmo experimenta após a retirada da carga usada para o dobramento da chapa é elasto-plástico, ou seja, é constituído por uma recuperação elástica e plástica. Por outro lado, quando o encruamento é admitido como sendo isotrópico, o retorno da chapa é apenas elástico (figura 2(c)). Diante disso, a determinação da forma e das dimensões da chapa antes da operação de dobramento (Figura 2a) fica incorreta, devido ao erro na descrição do encruamento durante essa operação de conformação mecânica (Figura 2b).

É necessário destacar que a previsão do retorno do material após a retirada da carga depende ainda de outras variáveis que contribuem para o aparecimento do encruamento cinemático, como o estado inicial do material, o amaciamento permanente ocasionado pelo carregamento Bauschinger e a quantidade de pré-deformação que pode afetar até mesmo o módulo de elasticidade do material.⁽⁴⁾

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho é investigar as características de encruamento do latão CuZn34 após a imposição de uma rota de carregamento do tipo Bauschinger (cisalhamento direto-cisalhamento reverso), sob três valores de pré-deformação em cisalhamento direto (deformação equivalente (ϵ_e) de 0,10, 0,25 e 0,35) com uso de parâmetros que atestam a magnitude do efeito Bauschinger, em termos da tensão (β_σ), da deformação (β_ϵ), além de características físicas (tensão interna (σ_{int}) e tensão efetiva (σ_{eff}).⁽⁵⁾

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material

Este trabalho utilizou chapas do latão CuZn34 no estado como recebido (pré-encruado) e recozido (temperatura de 540°C, durante 5.400 s), com espessura

inicial de 0,50 mm e composição química (% em peso) de 0,052C, 0,316Mn, 0,015P, 0,015S, < 0,05Si e 65,75Cu, 34,19Zn, 0,010Pb, 0,025Fe.

2.2 Carregamento Bauschinger (Cisalhamento Direto – Cisalhamento Reverso)

O ensaio de cisalhamento foi utilizado com uso de um dispositivo adaptado à máquina de ensaios INSTRON 5582 para a execução da rota de carregamento mecânico Bauschinger, mediante a combinação de cisalhamento direto (Figura 3a) e cisalhamento reverso (Figura 3b).

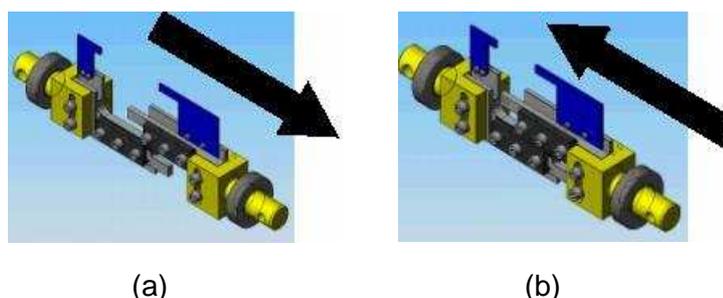


Figura 3. Esquema da sequência Bauschinger envolvendo o ensaio de cisalhamento: (a) cisalhamento direto e (b) cisalhamento reverso.

A máquina de ensaios mecânicos INSTRON 5582 foi ajustada para uma velocidade do cabeçote superior de 0,386 mm/min (taxa de deformação de $0,001s^{-1}$), sendo todos os testes conduzidos na direção de laminação original das chapas de latão (0^oDL) com uso de corpos de prova retangulares com 50 mm de comprimento e 3,5mm de largura efetiva (largura total de 15 mm).

As chapas de latão foram pré-deformadas em cisalhamento direto (Figura 3a) de três valores de pré-deformação equivalente (ϵ_{et}): 0,10, 0,25 e 0,35 para avaliar o efeito do aumento da quantidade de pré-deformação no encruamento do material. Em seguida, o sentido do movimento do cabeçote da máquina foi invertido (cisalhamento reverso) até um valor de deformação equivalente de 0,50.

O cálculo da deformação e da tensão cisalhantes (τ e γ , respectivamente) foi feito de acordo com o procedimento descrito em trabalho anterior,⁽⁶⁾ assim como a conversão da tensão e da deformação cisalhantes em tensão e em deformação equivalentes (σ_e e ϵ_e , respectivamente). Neste último caso, utilizou-se o fator 1,84, como indicado pelas equações (1) e (2).

$$\epsilon_e = \gamma/1,84 \quad (1)$$

$$\sigma_e = 1,84.\tau \quad (2)$$

2.3 Indicadores do Efeito Bauschinger

O efeito do carregamento Bauschinger no encruamento do latão foi feito através do cálculo de parâmetros de tensão (β_σ), de deformação (β_ϵ), além de indicadores que utilizam uma abordagem física para descrever o fenômeno do carregamento Bauschinger como a tensão interna ou *back stress* (σ_{int}) e a tensão efetiva (σ_{eff}).⁽⁵⁾

O indicador de tensão (β_σ) representa a redução da tensão de fluxo após a imposição do carregamento Bauschinger, sendo calculado de acordo com a equação (3).⁽⁵⁾

$$\beta_\sigma = (\sigma_f + \sigma_r) / 2 \quad (3)$$

Já o parâmetro de deformação (β_ϵ) considera a mudança do ponto de deformação plástica (ponto **B** da figura 4) após a reversão do sentido da deformação plástica, em relação ao valor de pré-deformação (ponto **A** da figura 4). A equação (4) exhibe o método usado para o cálculo de β_ϵ .⁽⁵⁾

$$\beta_\epsilon = B / A \quad (4)$$

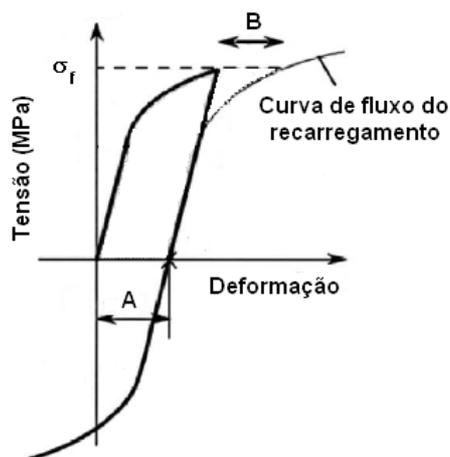


Figura 4. Esquema de uma curva tensão – deformação para demonstração do método de cálculo do parâmetro de deformação do efeito Bauschinger (β_ϵ).

A tensão efetiva (σ_{eff}) e a tensão interna (σ_{int}) são outros parâmetros que complementam a descrição do efeito Bauschinger dos materiais, sendo utilizadas quando se deseja verificar a predominância da natureza do encruamento do material (isotrópico ou anisotrópico). A tensão interna está associada ao processo de deformação local, representando as tensões de longo alcance que atuam sobre as discordâncias móveis. O efeito Bauschinger é frequentemente explicado em termos da tensão interna. A acumulação dessas tensões ocasiona a polarização do encruamento e, portanto, com o encruamento anisotrópico do material.

A tensão efetiva (ou tensão de atrito) está relacionada com as tensões de curto alcance que atuam sobre as discordâncias móveis. Esse tipo de tensão é associado com o encruamento isotrópico pelo fato de representar o tamanho do domínio elástico para um valor específico de deformação plástica. O material tende para o comportamento isotrópico quanto menor é o valor da tensão efetiva, até atingir a condição ideal, quando σ_{eff} é igual a zero.

As equações (5) e (6) mostram a metodologia utilizada para o cálculo de σ_{int} e de σ_{eff} , respectivamente.

$$\sigma_{int} = (\sigma_f + \sigma_r) / 2 \quad (5)$$

$$\sigma_{eff} = (\sigma_f - \sigma_r) / 2 \quad (6)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 5 mostra as curvas de tensão equivalente-deformação equivalente para o latão como recebido (Figura 5a) e recozido (Figura 5b) para os três valores de pré-deformação avaliados neste trabalho: 0,10, 0,25 e 0,35.

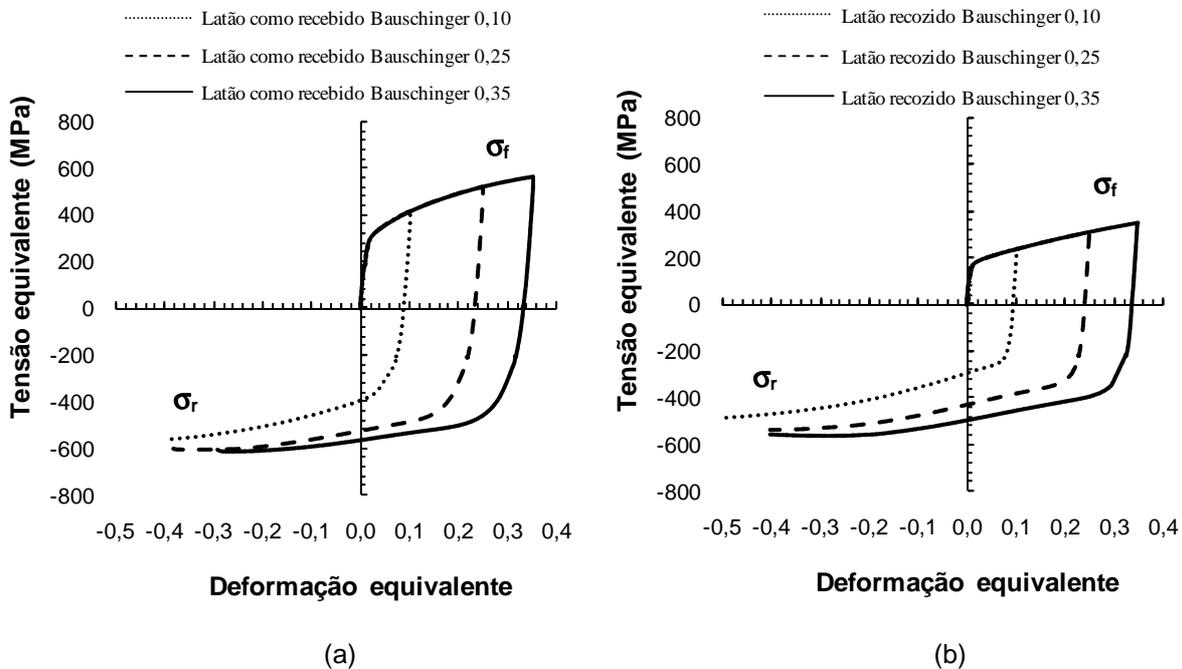


Figura 5. Curvas tensão equivalente - deformação equivalente para o latão CuZn34 pré-deformado em cisalhamento direto de 0,10, de 0,25 e de 0,35 na condição: (a) como recebido e (b) recozido.

A tensão máxima ao final do carregamento direto (σ_f) aumenta com a quantidade de pré-deformação, para ambas as condições iniciais do latão, sendo esse aumento relativamente maior para o latão na condição como recebido, devido ao estado pré-encruado do material. De forma análoga, a tensão máxima ao final do carregamento reverso (σ_r) também é maior com o aumento da pré-deformação. No entanto, percebe-se que a curva de fluxo do latão pré-deformado de $\epsilon_e = 0,35$ apresenta uma queda acentuada com a continuidade da deformação plástica em cisalhamento reverso, de forma que as curvas referentes à pré-deformação de 0,25 e de 0,25 se aproximam ao término do carregamento reverso.

Esse fato sugere que o amaciamento ocasionado pelo carregamento Bauschinger (um dos resultados do efeito Bauschinger,⁽⁷⁾ do latão na condição como recebido seja maior que o observado para o latão na condição recozido.

O amaciamento (queda da tensão de fluxo com o aumento da deformação plástica) está relacionado com a reestruturação da subestrutura de discordâncias ocasionada pela modificação do sentido de deformação plástica. Isso indica que a taxa de encruamento do latão no estado como recebido tenha sofrido uma oscilação mais acentuada que a do latão recozido.

Para facilitar a comparação do comportamento mecânico do latão sob carregamento monotônico em cisalhamento com o detectado após a mudança na trajetória de deformação (carregamento Bauschinger), os eixos da ordenada e da abscissa das curvas tensão equivalente - deformação equivalente exibidas na figura 5 foram invertidos para a construção do gráfico mostrado na Figura 6.

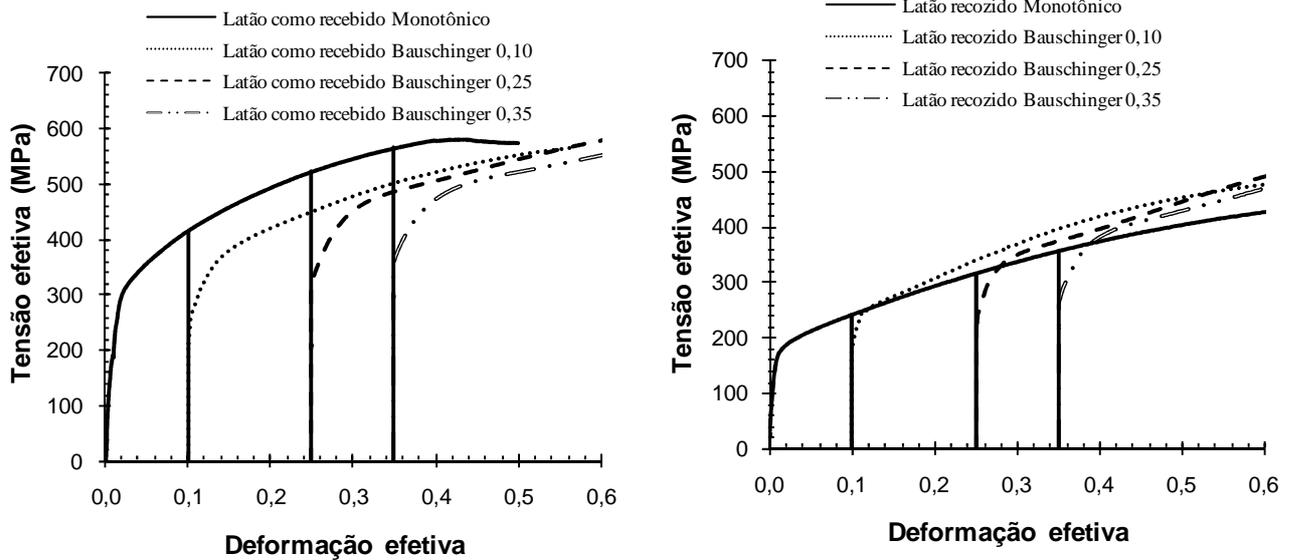


Figura 6. Curvas tensão equivalente - deformação equivalente para o latão CuZn34 com a inversão dos eixos para a pré-deformação em cisalhamento direto de 0,10, 0,25 e 0,35: (a) latão como recebido e (b) latão recozido.

A análise da Figura 6 revela que o latão nas duas condições (como recebido e recozido) exibiu o efeito Bauschinger (tensão de fluxo no início do recarregamento em cisalhamento reverso abaixo da tensão de fluxo do carregamento monotônico, para a mesma quantidade de deformação plástica) após a aplicação da sequência de carregamento cisalhamento direto/cisalhamento reverso. Isso confirma que o encruamento do latão foi modificado após a mudança da trajetória de deformação.

A Figura 6(a) revela ainda que o latão no estado como recebido apresentou um amaciamento permanente maior que o exibido pelo latão recozido (Figura 6), pois as curvas de fluxo do latão na primeira condição ficaram sempre abaixo da curva do carregamento monotônico em cisalhamento.

A magnitude do efeito Bauschinger em função do estado inicial do latão (como recebido e recozido) e da quantidade de pré-deformação é mostrada na Tabela 1 com uso dos valores da tensão de fluxo ao final do carregamento em cisalhamento direto (σ_f) e no início do recarregamento em cisalhamento direto (σ_r).

Pode-se verificar que o aumento do valor da pré-deformação ocasionou uma redução do efeito Bauschinger, sendo isso indicado pela diminuição da diferença dos valores das tensões σ_f e σ_r . Esse resultado deve-se necessariamente à resistência maior da subestrutura de discordâncias criada na pré-deformação do latão à desestruturação que ocorre durante a aplicação do cisalhamento reverso.⁽⁸⁾

Tabela 1. Variação dos valores da tensão de fluxo ao final do cisalhamento direto (σ_f) e no início do cisalhamento reverso (σ_r), em função do estado inicial e da quantidade de pré-deformação do latão.

Condição	Pré-deformação	σ_f (MPa)	σ_r (MPa)	Diferença (MPa)	Variação (%)
Como recebido	0,10	416	209	207	-50
	0,25	522	301	221	-42
	0,35	564	357	207	-37
Recozido	0,10	239	166	73	-31
	0,25	314	219	95	-30
	0,35	354	259	95	-27

Esses resultados revelam a influência do estado inicial do latão (como recebido e recozido) no encruamento desse material. A redução maior da taxa de encruamento do latão no estado como recebido pode ser relacionada à dificuldade maior em desestruturar o arranjo de discordâncias após a mudança do caminho de deformação.⁽⁹⁾

Neste caso, considerando que o latão no estado como recebido e recozido possuem o mesmo tipo de estrutura cristalina (cúbica de faces centradas – CFC) e que o latão quando no primeiro estado (como recebido) foi submetido a algum processamento mecânico anterior ao início do carregamento Bauschinger (laminação a frio, por exemplo), pode-se afirmar que a disposição das discordâncias do latão nessa condição (como recebido) foi mais resistente à reorganização após a mudança na trajetória de deformação.

Com o objetivo de quantificar o efeito do carregamento Bauschinger no encruamento do latão, a Figura 7 mostra a variação dos parâmetros de tensão (β_σ) e de deformação (β_ϵ) em função da quantidade de pré-deformação para os dois estados iniciais do latão.

A Figura 7 revela que o encruamento do latão, para ambos os estados iniciais, como recebido e recozido, foi anisotrópico (cinemático), pois os valores de β_σ (Figura 7) ficou abaixo de 2 (condição de encruamento isotrópico, vide definição desse indicador na equação 6). Verifica-se ainda que, para as duas condições iniciais do latão, o aumento da quantidade de pré-deformação em cisalhamento direto reduz a diferença de comportamento mecânico entre o latão, expressa pelo parâmetro β_σ .

O fato de β_σ aumentar, tendendo para a condição de encruamento isotrópico, ou seja, quando β_σ é igual a 2, com o acréscimo da quantidade de deformação plástica em cisalhamento reverso deve-se à redução do efeito Bauschinger, sendo isso indicado pela redução da diferença entre as tensões de fluxo σ_f e σ_r (Tabela 1).

A diminuição do efeito Bauschinger com o aumento da quantidade de pré-deformação é explicado pelo aumento da resistência à desestruturação da subestrutura de discordâncias criada durante a pré-deformação do latão.⁽¹⁰⁾

Com relação ao indicador de deformação do efeito Bauschinger, β_ϵ , verifica-se pela análise da Figura 7(b) que o latão também apresentou comportamento cinemático para os dois estados iniciais, pois a situação de encruamento isotrópico ($\beta_\epsilon = 0$, vide pela análise da equação 6) não foi observada.

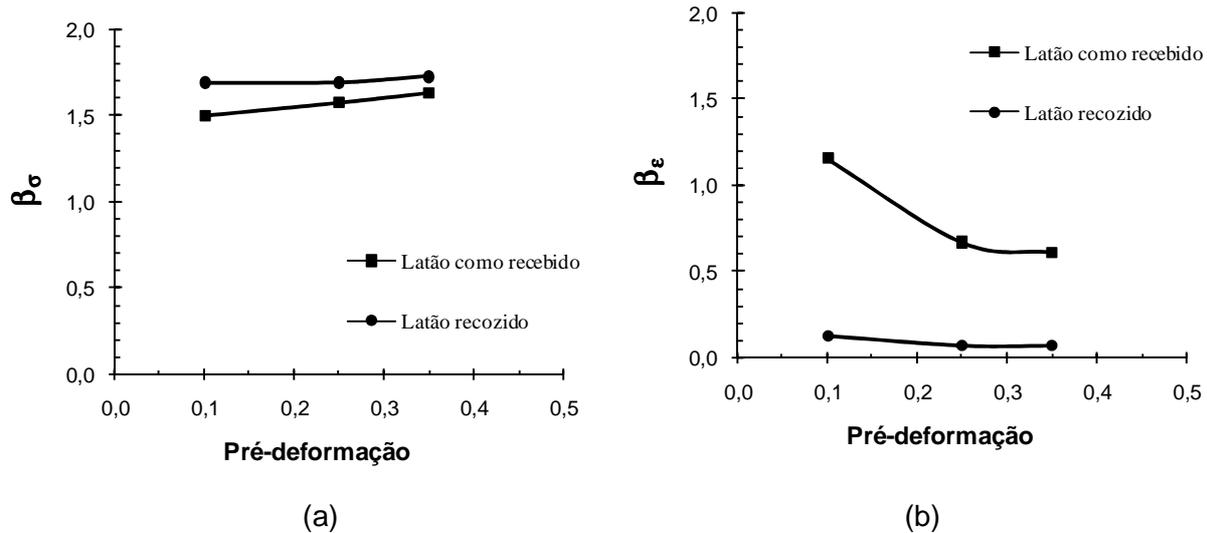


Figura 7. Variação dos indicadores do Efeito Bauschinger em função da quantidade de pré-deformação para o latão no estado como recebido e recozido: (a) indicador de tensão (β_σ) e (b) indicador de deformação (β_ϵ).

Para as duas condições iniciais do latão, observa-se uma queda acentuada do valor de β_ϵ quando se altera a quantidade de pré-deformação de 0,10 para 0,25 para em seguida, se manter praticamente constante quando se aplica 0,35 de deformação equivalente para pré-deformar o latão.

Como esperado, o latão no estado como recebido por ter sido submetido a algum processo de conformação mecânica anterior ao início do carregamento Bauschinger, apresentou comportamento de encruamento cinemático mais evidente que o revelado pelo latão quando recozido.

A confirmação do encruamento cinemático para o latão submetido ao carregamento Bauschinger pode ser verificada pela interpretação da Figura 8 que mostra a variação da tensão interna (σ_{int}) e da tensão efetiva (σ_{eff}) em função da quantidade de pré-deformação para o latão. A Figura 8(a) revela que o valor de σ_{int} aumenta com a quantidade de pré-deformação, pois o valor da tensão de fluxo no início do recarregamento (σ_r) também aumenta. O comportamento cinemático do encruamento é detectado para o latão porque os valores da tensão interna são menores que os valores da tensão de fluxo ao final do carregamento direto (σ_f , pontos tracejados na Figura 8 a). Caso a condição de encruamento isotrópico fosse observada, os valores de σ_{int} e de σ_f seriam iguais (vide definição de σ_{int} na equação 7).

Por fim, a Figura 8(b) mostra os valores da tensão efetiva (σ_{eff}) em função da pré-deformação para o latão no estado como recebido e recozido. Novamente o encruamento do latão foi nitidamente cinemático, pois a magnitude de σ_{eff} foi diferente de zero, condição de encruamento isotrópico. Nota-se ainda que os valores de σ_{eff} , assim como os de β_ϵ , foram pouco sensíveis ao aumento da quantidade de pré-deformação. Contudo, pode-se observar que, embora o latão recozido tenha exibido comportamento de encruamento cinemático, esta foi a condição inicial do latão que exibiu o menor valor de σ_{eff} .

Os resultados discutidos neste trabalho atestam que embora o encruamento do latão no estado recozido e como recebido sob carregamento Bauschinger seja anisotrópico (cinemático), constatou-se que na condição recozido, a tendência do material apresentar comportamento isotrópico é maior, admitindo-se assim, sob avaliação da situação de uso, a possibilidade de uso do encruamento isotrópico.

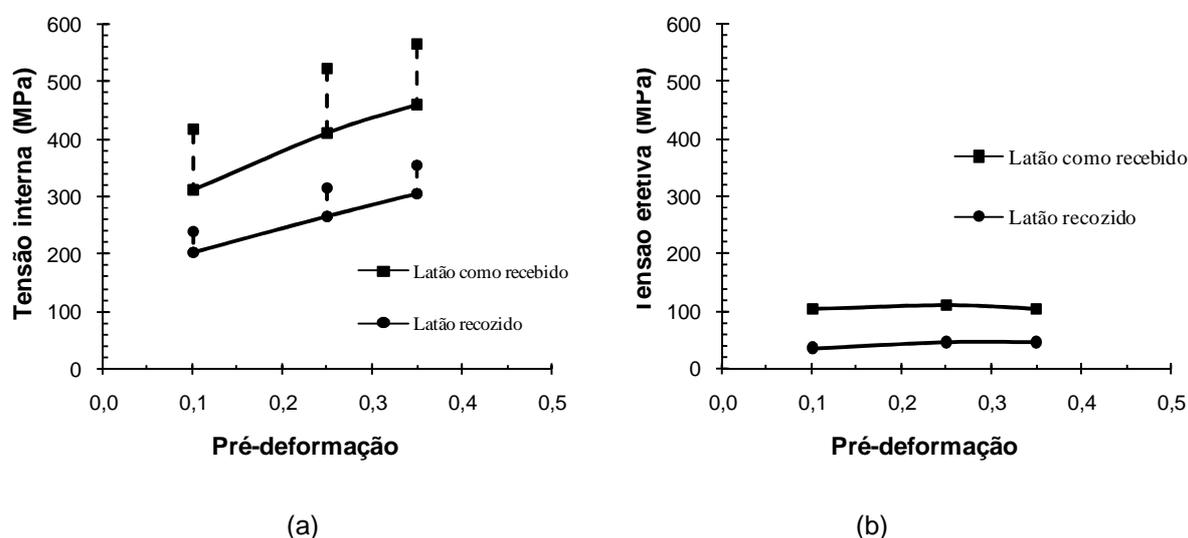


Figura 8. Variação: (a) tensão interna (σ_{int}) e (b) tensão efetiva (σ_{eff}) para o latão no estado como recebido e recozido.

4 CONCLUSÕES

A aplicação do carregamento Bauschinger para o latão no estado como recebido (pré-encruado) e recozido com três valores de pré-deformação equivalente ($\epsilon_{et} = 0,10, 0,25$ e $0,35$) revelou que:

- a característica de encruamento do latão, para todos os valores de pré-deformação e condição inicial discutidos neste trabalho foi de encruamento anisotrópico (cinemático), como indicado pelos resultados referentes aos parâmetros β_σ , β_ϵ , σ_{int} e σ_{eff} ;
- a variação dos valores da tensão efetiva (σ_{eff}) com a quantidade de pré-deformação, para as duas condições do latão, foi pequena ou nula;
- para a mesma quantidade de pré-deformação em cisalhamento direto, o efeito Bauschinger e a tendência de encruamento cinemático foram maiores para o latão no estado como recebido (pré-encruado), quando comparado com o latão no estado recozido;
- o efeito Bauschinger e, portanto, o encruamento cinemático, reduziu com o aumento da quantidade de pré-deformação, como indicado pelo parâmetro de tensão do carregamento Bauschinger (β_σ), para os dois estados iniciais do latão;
- a sensibilidade do indicador de deformação do efeito Bauschinger (β_ϵ) com a quantidade de pré-deformação (ϵ_{et}) foi observada apenas para o latão no estado como recebido para um valor de ϵ_{et} menor que $0,25$, mantendo-se constante para ϵ_{et} igual ou maior que $0,25$.

Agradecimentos

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

REFERÊNCIAS

- 1 JORDON, J.B., HORSTEMEYER, M.F., SOLANKI, K., XUE, Y. *Damage and Stress State Influence on the Bauschinger Effect in Aluminum Alloys*. *Mechanics of Materials*, v. 39, p. 920-931, (2007);
- 2 YOSHIDA, F., UEMORI, T. *A Model of Large-Strain Cyclic Plasticity and its Application to Springback Simulation*. *International Journal of Mechanical Sciences*, v.45, p. 1687-1702, (2003);
- 3 KURODA, M., TVERGAARD, V. *Forming Limit Diagrams for Anisotropic metal Sheets with Different Yield Criteria*. *International Journal of Solid and Structures*, v. 37, p. 5057-5059, (2000);
- 4 YAMAGUCHI, K., ADACHI, H., TAKAKURA, N. *Effects of Plastic Strain Path on Young's Modulus of Sheet Metals*. *Metals and Materials*, v.4, p. 420-425, (1998);
- 5 CHOTEAU, M., QUAEGBEUR, P., DEGALLAIX, S. *Modelling of Bauschinger Effect by Various Constitutive Relations Derived from Thermodynamical Formulation*. *Mechanics of Materials*, v.37, p. 1143-1152, (2005);
- 6 LOPES, W., CÔRREA, E.C.S., CAMPOS, H.B., AGUILAR, M.T.P., CETLIN, P.R.. *Efeito do valor da pré-deformação em cisalhamento na deformação cíclica de um aço de baixo teor de carbono e do latão*. *Anais do 64º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração*, p. 248–257, (2008);
- 7 HORSTEMEYER, M.F. *Damage Influence on Bauschinger Effect of a Cast A356 Aluminum Alloy*. *Scripta Materialia*, v.39, n. 11, p. 1491-1495, (1998);
- 8 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);
- 9 DIRRAS, G.F., DUVAL, J.L., SWIATNICKI, W. *Macroscopic Behaviour versus dislocation Substructures Development under Cyclic Shear Tests on the Aluminium-3004 Alloy*. *Materials Science and Engineering*, v.263A, p. 85-95, (1999).
- 10 WILSON, D.V., ZANDRAHIMI, M., ROBERTS, W.T. *Effects of Strain Path Changes in Strain Path on the Work Hardening in CP Aluminum and Al-Cu-Mg Alloy*. *Acta Metallurgica et Materialia*, v.32, n.2, p. 215-226, (1990).