

# ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS DE INSTABILIDADES PLÁSTICAS NA TRAÇÃO PARA DOIS METAIS PRÉ-DEFORMADOS EM LAMINAÇÃO<sup>1</sup>

Wellington Lopes<sup>2</sup>  
Elaine Carballo Siqueira Corrêa<sup>3</sup>  
Haroldo Béria Campos<sup>4</sup>  
Maria Teresa Paulino Aguilar<sup>5</sup>  
Paulo Roberto Cetlin<sup>6</sup>

## Resumo

Vários estudos têm sido feitos para compreender as relações entre as características estruturais e as variáveis de processo nas respostas mecânicas apresentadas por materiais metálicos usados em processos de conformação mecânica. Uma maneira de investigar os efeitos desses parâmetros na conformabilidade de um material é através do uso de ensaios mecânicos especiais, capazes de criar condições de deformação plástica semelhantes às observadas nos processos reais. Contudo, para descrever detalhadamente os diversos fenômenos detectados em tais situações, podem-se utilizar também métodos de simulação numérica. O objetivo deste trabalho foi analisar o comportamento mecânico apresentado pelo aço de baixo teor de carbono e pelo latão CuZn34 após a sequência de carregamento laminação/tração, utilizando testes experimentais e método de simulação numérica por elementos finitos. Os resultados mostraram a influência da história de deformação e das características estruturais no comportamento mecânico detectado.

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

## ANALYZE THROUGH FINITE ELEMENT METHOD OF PLASTIC INSTABILITIES IN TENSION FOR TWO METALS PRESTRAINED IN ROLLING

## Abstract

Various studies have been presented covering the relationship among the structural characteristics and the processes variables on the mechanical behavior of metallic materials used in forming operations. A method to investigate the effect of these parameters on the material formability involves special tests able to create conditions similar those observed in actual operations. Numerical techniques can be also used to describe the phenomena observed in these situations. The aim of this paper was to analyze the mechanical behavior presented by the low carbon steel and by the CuZn34 brass following a rolling/tension loading sequence, using experimental tests and finite element method. The results showed the influence of the strain-path changes and the structural characteristics on the materials on the detected mechanical behavior.

**Key words:** strain path; low carbon steel; brass; Finite Element Method.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Professor, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG, Campus VII, Timóteo/MG, Departamento de Metalurgia, wellington@timoteo.cefetmg.br.

<sup>3</sup> Professor, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG.

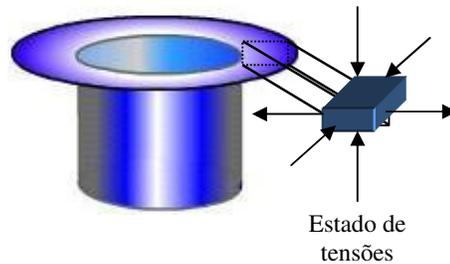
<sup>4</sup> Professor, UFMG, Departamento de Engenharia Mecânica.

<sup>5</sup> Professor, UFMG, Departamento de Engenharia de Materiais e da Construção Civil.

<sup>6</sup> Professor, UFMG, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

## 1 INTRODUÇÃO

As diversas operações de conformação mecânica, como a estampagem de chapas, são caracterizadas por submeterem um material à deformação plástica com a utilização de vários tipos de esforços mecânicos. Numa operação de embutimento profundo de um copo, por exemplo, o material é comprimido, estirado e cisalhado.<sup>(1)</sup> A Figura 1 mostra o esquema do estado de tensões presente na aba (flange) de um copo conformado por embutimento profundo com uso de um punção e de um prensa-chapas.



**Figura 1.** Esquema da distribuição de tensões em um copo estampado por embutimento profundo.

Em operações de conformação mecânica, como aquela mostrada pela Figura 1, um material experimenta um estado de tensões e de deformações complexos, dificultando assim, a investigação desses parâmetros em processos reais de fabricação. Deste modo, vários ensaios foram desenvolvidos para indicar, por exemplo, o limite de deformação plástica de um metal sem a ocorrência de defeitos superficiais ou mesmo trincas (conformabilidade). Dentre os diversos tipos de ensaios usados, podem ser citados os ensaios Swift e Erichsen, além dos diagramas de limite de conformação (FLC).<sup>(2-3)</sup> No entanto, esses ensaios possuem limitações, como a utilização de valores de deformação plástica relativamente pequenos para impedir o aparecimento de instabilidades plásticas, comumente encontradas nos ensaios de tração tradicionais.

Desta forma, alguns ensaios mecânicos foram adaptados<sup>(4)</sup> e criados outros como o cisalhamento de chapas,<sup>(5)</sup> para descrever de forma mais apropriada as operações de transformação mecânica. Além disso, as análises numéricas por elementos finitos possibilitaram uma descrição mais detalhada dos fenômenos e das diversas variáveis presentes nesses processos, como o tipo de ferramental e as condições de lubrificação.<sup>(6)</sup> A simulação numérica com uso de elementos finitos juntamente com essas técnicas de ensaios mecânicos podem ser considerados métodos complementares. Os ensaios mecânicos fornecem as curvas de fluxo que serão utilizadas na simulação numérica, permitindo uma caracterização mais próxima da realidade real da operação em questão.

O conhecimento das respostas apresentadas pelos metais sob condições de deformação plástica intensa é essencial para a caracterização dos diversos tipos de produtos obtidos por operações de conformação mecânica. Uma carroceria de um automóvel, por exemplo, que foi conformada por processos de estampagem como estiramento e embutimento profundo, experimenta desde o seu processo de fabricação uma combinação de deformação plástica intensa e tipos variados de esforços mecânicos. Esse estado complexo de carregamento mecânico é capaz de modificar o encruamento típico dos metais, alternando estados de elevação e de redução da taxa de encruamento à medida que o material é deformado.<sup>(7)</sup> Assim, é

necessário considerar esse comportamento mecânico atípico dos metais quando os mesmos são deformados intensamente.

Novamente, em um acidente veicular, por exemplo, o material experimentará uma deformação plástica severa. Nessa situação, o aparecimento de trincas e de fraturas na chapa do veículo inibe a dissipação de energia necessária à proteção do condutor. Desta forma, a descrição do limite de deformação plástica de um metal em condições semelhantes é importante para a melhoria do processo de fabricação e do uso do produto.<sup>(8)</sup>

A determinação do comportamento mecânico de um metal em condições similares às observadas em processos reais de conformação mecânica é difícil devido à influência de diversas variáveis que afetam as respostas dos metais. A quantidade de deformação inicial (pré-deformação), a direção de solicitação, os tipos e a seqüência em que os esforços mecânicos são aplicados, definindo o que se caracterizou por trajetória ou caminho de deformação, além do próprio tipo de material são fatores que afetam a ocorrência e a magnitude dos fenômenos detectados nas operações de conformação mecânica.<sup>(5,9)</sup>

Considerando a necessidade de se determinar as influências do modo de deformação e das características estruturais de materiais submetidos à deformação plástica intensa, esse trabalho investiga a ocorrência de instabilidade plástica para o aço de baixo teor de carbono e para o latão com o uso de técnicas experimentais auxiliada pelo método de simulação numérica por elementos finitos.

## **2 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1 Materiais**

A composição química (% em peso) do aço de baixo teor de carbono e do latão CuZn34 (latão amarelo, liga C-268) utilizados neste trabalho foi de: 0,052C, 0,316Mn, 0,015P, 0,015S, < 0,05Si e 65,75Cu, 34,19Zn, 0,010Pb, 0,025Fe, respectivamente.

As amostras de aço e de latão foram utilizadas no estado como recebido, ou seja, elas não foram submetidas a nenhum tipo de tratamento termo-mecânico posterior à entrega das mesmas pelos respectivos fabricantes. O aço apresentou dureza inicial de  $106 \pm 5$  HV enquanto o latão,  $130 \pm 2$  HV, o qual é superior ao comumente observado para o latão recozido,  $R_{70}$  HV.

A chapa de latão possui a designação padrão O82 (antigo padrão  $\frac{1}{2}$  duro), indicando ter sido submetido a algum processamento mecânico para produzir um encruamento prévio. O aço de baixo teor de carbono, ao contrário do latão, foi entregue recozido.

A espessura inicial das chapas de aço e de latão, antes, portanto, da laminação a frio (primeira etapa da seqüência de carregamento), foi de 0,60mm e de 0,51mm, respectivamente.

### **2.2 Processamento Mecânico**

O aço de baixo teor de carbono e o latão CuZn34 foram submetidos a uma seqüência de deformação composta por uma pré-deformação em laminação a frio seguida por um teste de tração. Os itens descrevem cada uma dessas etapas de deformação plástica e o ensaio de cisalhamento que foi utilizado para a caracterização desses materiais.

### 2.2.1 Laminação a frio

O primeiro estágio de deformação plástica da seqüência de carregamento **laminação/tração** foi conduzido em um laminador Fröhling ajustado para a laminação a frio, com cilindros de 200mm de diâmetro e velocidade de laminação de 6,25 m/min. A deformação foi realizada na mesma direção da laminação original da chapa, ou seja, a 0° em relação à direção de laminação, DL.

A quantidade de deformação efetiva,  $\epsilon_e$ , aplicada aos dois materiais foi de 0,15, sendo a mesma calculado de acordo com o critério de von Mises, Equação (1).

$$\epsilon_e = 2/\sqrt{3} \ln(t_0/t_f) \quad (1)$$

$t_0$  = Espessura inicial da chapa, (mm);

$t_f$  = Espessura final da chapa, (mm).

### 2.2.2 Tração

A última etapa do carregamento mecânico da seqüência de carregamento laminação/**tração** foi realizada numa máquina de ensaios Instron 5582, ajustada para uma velocidade do cabeçote superior de 4,5 mm/min, resultando numa taxa de deformação inicial de 0,001 s<sup>-1</sup>. Neste caso, o aço e o latão foram deformados de 0,08 de deformação verdadeira (deformação efetiva).

Os ensaios foram feitos na direção de laminação da chapa em corpos de prova não-entalhados, de acordo com a norma ISO 50, com comprimento total de 135 mm e largura útil de 12,5 mm.

### 2.2.3 Cisalhamento

Essa técnica de ensaio foi usada para a caracterização mecânica do aço de baixo teor de carbono e do latão, pois permite a deformação plástica intensa sem a formação de pontos de estricção.

O teste de cisalhamento em chapas foi executado mediante a adaptação de um dispositivo<sup>(5)</sup> à máquina de ensaios Instron 5582, a qual foi ajustada para uma velocidade do cabeçote superior de 0,386 mm/min, resultando num valor de taxa de deformação de 0,001 s<sup>-1</sup>. Todos os testes foram conduzidos a 0°DL, utilizando corpos de prova retangulares com 50mm de comprimento de 50 mm e 3,5 mm de largura efetiva.

A deformação cisalhante foi calculada através da razão entre o alongamento vertical,  $\Delta L$ , e a largura efetiva,  $b$ , com a utilização de um projetor de perfis. Já a tensão cisalhante foi calculada através da razão da carga,  $P$ , pela área cisalhada,  $A_{cis}$ , comprimento x espessura da chapa.

Por fim, a conversão da tensão e da deformação cisalhantes em tensão e deformação efetivas foi efetuada mediante o uso do fator 1,84 que apresentou a melhor relação entre os ensaios de tração (teste de referência) e de cisalhamento.<sup>(5)</sup> As Equações (2) e (3) demonstram o método de cálculo usado para essa conversão.

$$\epsilon_e = \gamma/1,84 \quad (4)$$

$$\sigma_e = 1,84.\tau \quad (5)$$

$\epsilon_e$  = deformação efetiva;

$\sigma_e$  = tensão efetiva;

$\gamma$  = deformação cisalhante;

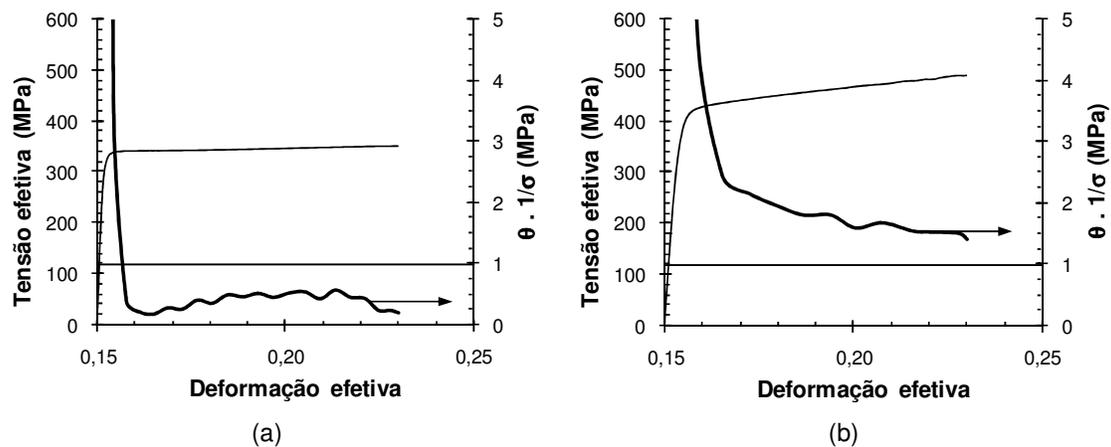
$\tau$  = tensão cisalhante.

## 2.3 Simulação Numérica por Elementos Finitos

As simulações numéricas utilizadas neste trabalho empregaram o software comercial Deform 2D versão 9.1. A simulação do ensaio de tração uniaxial em chapas empregou as curvas de fluxo do aço e do latão obtidas após a realização dos testes experimentais das amostras pré-deformadas em laminação de  $\epsilon_e = 0,15$ . Essas curvas de fluxo são mostradas na Figura 2, juntamente com as curvas representativas da taxa de encruamento normalizada, ou seja, a taxa de encruamento,  $\theta$ , multiplicada pelo inverso da tensão,  $1/\sigma$ .

A Figura 2(a) revela que o aço apresentou um encruamento transiente no início do recarregamento em tração, indicado pela oscilação da taxa de encruamento. O latão, ao contrário, exibe apenas uma queda contínua da taxa de encruamento com o aumento da deformação plástica em tração.

Um modelo elasto-plástico com encruamento isotrópico e estado plano de deformação foi empregado nessa simulação. O ensaio de tração foi realizado com uma velocidade de 0,075mm/s, adotando-se aproximadamente 832 passos com intervalo entre cada passo de 0,1s para se alcançar um valor de deformação efetiva de 0,08 nessa etapa, (0,23 de deformação efetiva acumulada). A discretização do corpo de prova foi efetuada com uso de uma malha constituída por 2500 elementos numéricos quadrados, 4 elementos ao longo da espessura e 4 elementos de integração.



**Figura 2.** Curvas de fluxo (tensão x deformação efetivas) e da taxa de encruamento normalizada obtidas em tração após a pré-deformação em laminação de  $\epsilon_e = 0,15$ : (a) aço de baixo teor de carbono e (b) latão CuZn34.

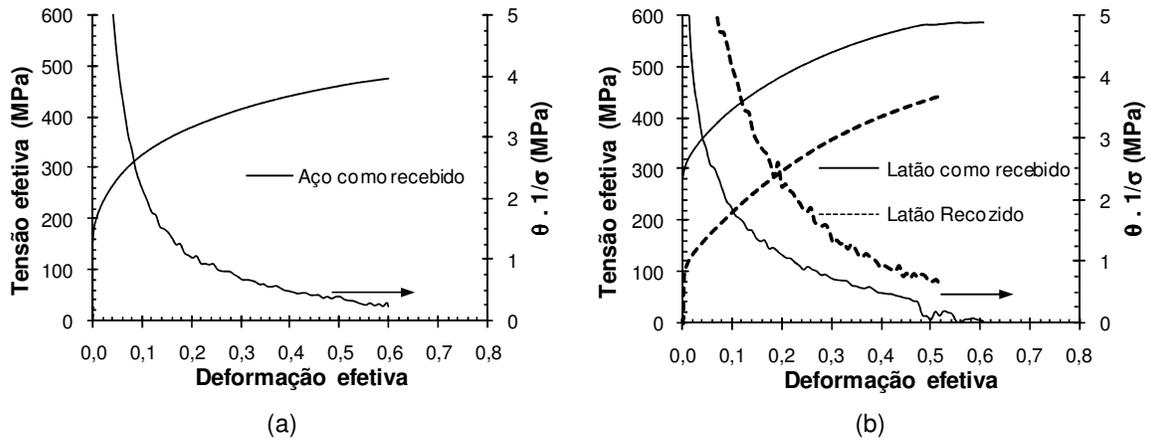
## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A condição inicial do material, em termos, por exemplo, do processamento termo-mecânico,<sup>(8)</sup> afeta as respostas apresentadas por um material quando imposto a uma combinação de esforços mecânicos. A Figura 3 mostra as curvas tensão x deformação efetivas obtidas após o carregamento monotônico em cisalhamento (0°DL) dos materiais usados neste trabalho.

Embora o aço e o latão tenham sido utilizados na condição como recebido, a curva referente ao cisalhamento monotônico do latão após recozimento a 540 °C por 90min, Figura 3(b), indica que o encruamento do latão apresenta a mesma tendência nas duas condições, ou seja, uma queda contínua da taxa de

encruamento com o aumento da deformação em cisalhamento. No entanto, é necessário considerar que para o latão recozido, essa queda é ligeiramente menor se comparada com o latão no estado como recebido.

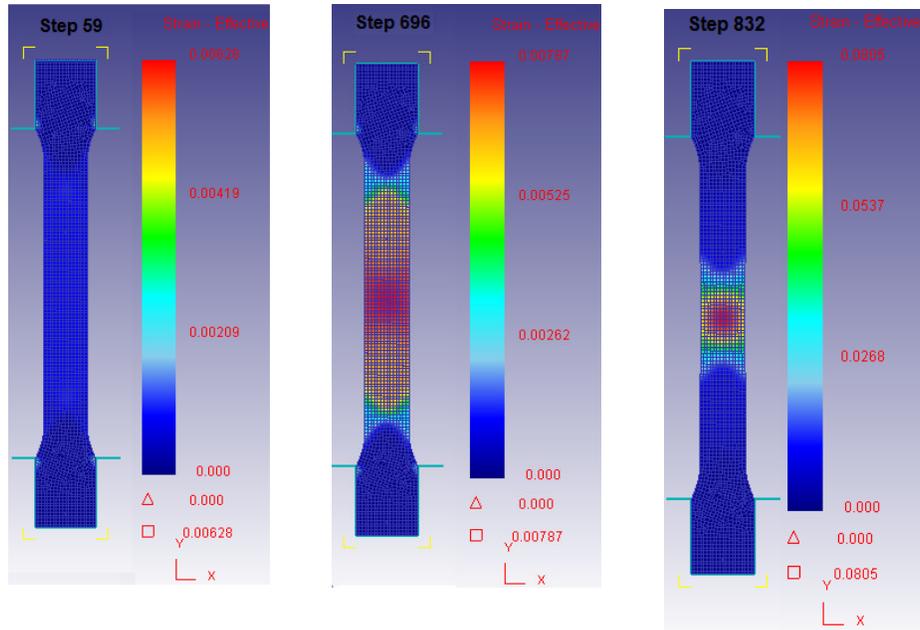
O latão recozido apresenta características típicas de um metal com estrutura cristalina cúbica de faces centradas (CFC), como valor para o limite de escoamento inferior ao registrado para o aço, o qual possui uma estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC).



**Figura 3.** Curvas de fluxo (tensão x deformação efetivas) obtidas através de cisalhamento monotônico para: (a) aço de baixo teor de carbono e (b) latão CuZn34.

A Figura 4 exibe três etapas da simulação do teste de tração do aço de baixo teor de carbono pré-deformado por laminação a frio de  $\epsilon_e = 0,15$ . Pode-se perceber pela análise da Figura 4(a) que esse material experimenta um estágio de deformação homogênea pequeno, inferior a  $\epsilon_e = 0,01$  ( $\approx 0,0065$ ). Em seguida, a deformação tende a se concentrar na região central da amostra, como mostrado pelas Figuras 4(b) e 4(c).

A distribuição de tensão, ao contrário do observado para a deformação, é relativamente mais uniforme. As Figuras 5(a) e 5(b) mostram que o valor de tensão apresenta uma variação de apenas 10 MPa desde o início da concentração da deformação (343 MPa) até o término do ensaio de tração (353 MPa).

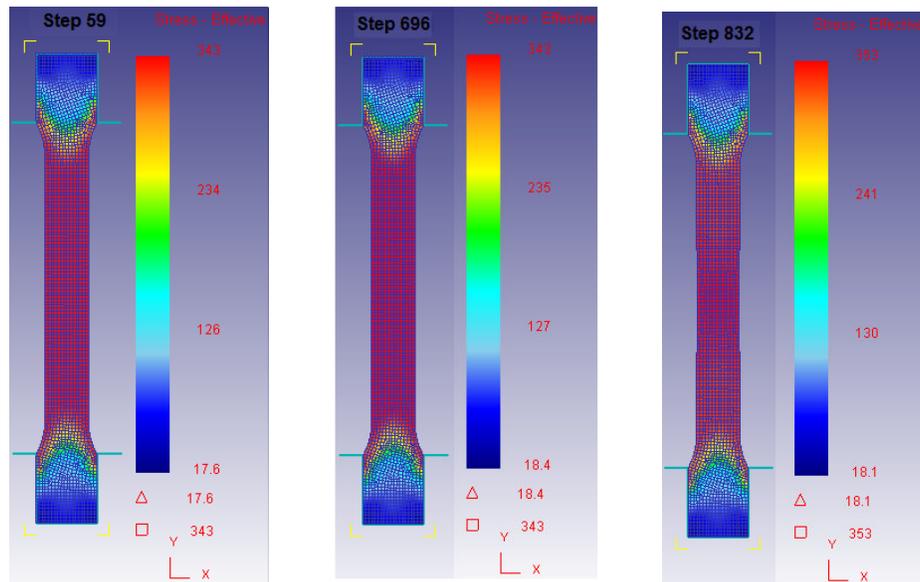


(a)

(b)

(c)

**Figura 4.** Distribuição da deformação efetiva para valores crescentes de deformação em tração para o aço pré-deformado em laminação de  $\epsilon_e = 0,15$ .



(a)

(b)

(c)

**Figura 5.** Distribuição da tensão efetiva para valores crescentes de deformação em tração para o aço pré-deformado em laminação de  $\epsilon_e = 0,15$ .

Estudos anteriores<sup>(10-11)</sup> demonstraram que os níveis de tensão observados em amostras de aço ao carbono pré-deformadas em laminação e em seguida, tracionadas, é função da quantidade de pré-deformação. O valor da tensão de fluxo no início do recarregamento em tração está relacionado com o aparecimento da instabilidade plástica do aço. Além disso, a extensão do encruamento transiente, associada à heterogeneidade da distribuição de deformação, aumenta com a

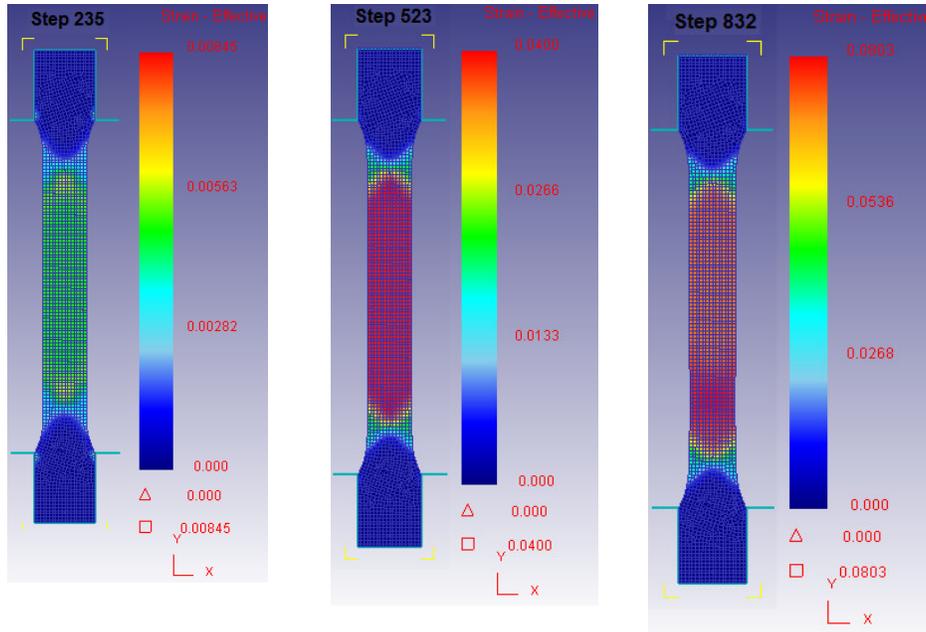
quantidade de pré-deformação. Valores maiores de pré-deformação reduzem a taxa de encruamento do material durante a deformação em tração.<sup>(10)</sup>

Os resultados indicam que a deformação em laminação de 0,15 (deformação efetiva) foi suficiente para provocar a instabilidade plástica, quase imediata na tração ulterior. Contudo, o comportamento mecânico macroscópico apresentado pelo aço, juntamente com os resultados da simulação numérica, sugerem que para as condições de deformação imposta a esse material, (laminação/tração), a subestrutura do material desenvolvida durante a pré-deformação não foi completamente destruída, pois após o período de oscilação da taxa de encruamento (veja Figura 2a), a tensão manteve-se praticamente constante com o recarregamento em tração.

O latão, ao contrário do aço, apresentou uma distribuição de deformação mais uniforme durante o ensaio de tração da amostra pré-deformada em laminação. A Figura 6 mostra que a deformação se espalhou por uma região maior da amostra, Figuras 6(a) e (b), antes de apresentar uma tendência para a concentração na parte inferior do corpo de prova, Figura 6(c). Esse comportamento associado ao aumento contínuo da tensão (variação de 54MPa, considerando a mesma referência de deformação plástica analisada para o aço), indica que nessa etapa de deformação o encruamento não apresentou sinais de oscilação, embora a taxa de encruamento tenha se reduzido com o aumento da deformação plástica (veja Figura 2b).

Por fim, a Figura 7 indica, assim como observado para o aço, que a distribuição de tensão não apresentou sinais de heterogeneidade intensa durante o carregamento em tração.

A discussão dos resultados apresentados pela simulação numérica em duas dimensões para o ensaio de tração realizado após a pré-deformação em laminação do aço e do latão considerou que a deformação plástica desses materiais ocorria apenas em dois eixos, ou seja, ao longo do comprimento e da largura. Contudo, deve-se considerar que os corpos de prova utilizados no ensaio de tração também sofrem deformação ao longo da espessura. Desta forma, a presente utilização de métodos de simulação numérica em duas dimensões representa uma análise parcial do problema sob discussão.

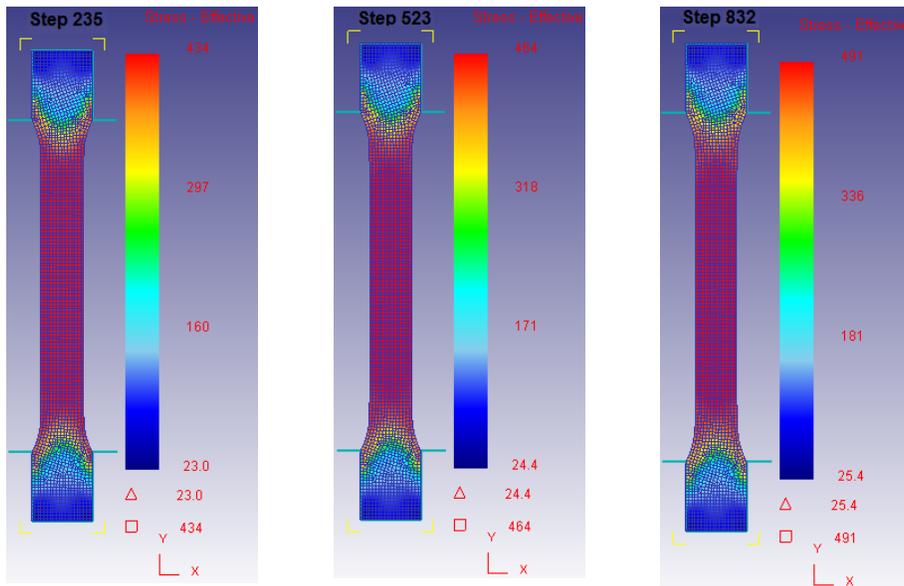


(a)

(b)

(c)

**Figura 6.** Distribuição da deformação efetiva para valores crescentes de deformação em tração para o latão pré-deformado em laminação de  $\epsilon_e = 0,15$ .



(a)

(b)

(c)

**Figura 7.** Distribuição da tensão efetiva para valores crescentes de deformação em tração para o latão pré-deformado em laminação de  $\epsilon_e = 0,15$ .

## 4 CONCLUSÕES

A imposição dos esforços mecânicos de laminação seguidos por esforços de tração mediante técnicas experimentais e métodos de simulação numérica em 2D por elementos finitos (para a tração) para o aço de baixo teor de carbono e para o latão CuZn34 indicou que:

- o encruamento apresenta oscilação após o recarregamento em tração para o aço e queda contínua da taxa de encruamento para o latão;
- a ocorrência de aumento do encruamento após um período de queda é devido, principalmente, às características estruturais do material;
- a presença de encruamento transiente, para um mesmo modo de deformação, depende das características estruturais do material; e
- a extensão do encruamento transiente aumenta com a quantidade de deformação prévia, independente do tipo de material.

## Agradecimentos

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

## REFERÊNCIAS

- 1 RAUCH, E.F. *Plasticity of Metals During Cold Working*, Multiscale Phenomena in Plasticity: from Experiments to Phenomenology, Springer, Paris, France, 529 p., (2000);
- 2 NAKAZIMA, K., KIKUMA, T., HASUKA, K. Yamata Technolglcal Report, p. 141-264, (1968);
- 3 GHOSH, A.K., HECKER, S.S., KEELER, S.P. In: Dieter GE (ed) *Workability Testing Techniques*. American Society for Metal, Metals Park, London, England; (1984);
- 4 BOGER, R.K., WAGONER, R.H., BARLAT, F., LEE, M.G., CHUNG, K. *Continuous, Large Strain, Tension/Compression Testing of Sheet Material*. International Journal of Plasticity, v.21, p. 2319-2343, (2005);
- 5 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);
- 6 CHEN, FUH-KUO., HUANG, TYNG-BIN., CHANG, CHIH-KUN. *Deep Drawing of Square Cups with Magnesium Alloy AZ31 Sheets*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v.43, p. 1553–1559, (2003);
- 7 GHOSH, A. K., BACKOFEN, W. A. *Strain Hardening and Instability in Biaxiality Stretched Sheets*. Metallurgical Transactions, v.4, p. 1113-1123, (1973);
- 8 TARIGOPULA, V., HOPPERSTAD, O.S., LANGSETH, M., CLAUSEN, A.H., HILD, F., LADEMO, O.G., ERIKSSON, M. *A Study of Large Plastic Deformations in Dual Phase Steel Using Image Correlation and FE Analysis*. Experimental Mechanics, v.48, p. 181-196, (2008);
- 9 GRACIO, J.J., BARLAT, F., RAUCH, E.F., JONES, P.T., NETO, V.F., LOPES, A.B. *Artificial Aging and Shear Deformation Behaviour of 6022 Aluminum Alloy*. International Journal of Plasticity, v.20, pp.427-445, (2004);
- 10 KORBEL, A., MARTIN, P. *Microstructural Events of Macroscopic Strain Localization in Prestrained Tensiles Specimens*. Acta Metallurgica, v.36, No 36, p. 2575-2586, (1998).
- 11 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, No 6, p. 537-550, (1998).