

## EFEITO DO CAMINHO DE DEFORMAÇÃO NO ENCRUAMENTO DO AÇO E LATÃO DEFORMADOS POR TRAÇÃO E TORÇÃO

**Elaine Carballo S. Corrêa**

Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Escola de Engenharia - UFMG.  
elaine@demet.ufmg.br

**Maria Teresa P. Aguilar**

Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, Escola de Engenharia - UFMG.  
teresa@demc.ufmg.br

**Paulo Roberto Cetlin**

Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia - UFMG.  
Rua Espírito Santo, 35 - Centro, Belo Horizonte, Minas Gerais. Brasil. CEP 30160-030.  
pctlin@demet.ufmg.br

***Resumo.** O comportamento mecânico de um metal depende tanto das variáveis do processo, como da maneira com que o mesmo é deformado. Sob condições de fabricação que resultam em variações do caminho de deformação, podem ocorrer transientes na taxa de encruamento do metal, que levam ao seu amaciamento ou endurecimento. Como durante as etapas de processamento do material podem ocorrer alterações no caminho de deformação, se faz interessante o estudo do escoamento plástico nessas condições. Neste trabalho são apresentadas curvas resultantes de mudanças abruptas no caminho de deformação. As mesmas são relacionadas com as curvas de escoamento padrão à tração e torção. Foram utilizados dois materiais: aço baixo carbono e latão. Foram observados comportamentos distintos de acordo com a natureza da pré-deformação aplicada e com o material utilizado.*

***Palavras-chave:** Caminho de deformação, Tração, Torção, Propriedades mecânicas*

### 1. INTRODUÇÃO

O comportamento mecânico à frio dos metais é usualmente caracterizado por uma relação monotônica entre a tensão aplicada e a deformação imposta pelo processo. Em geral, a curva de escoamento pode ser descrita por relações parabólicas como as equações de Hollomon ou Swift, correlacionando satisfatoriamente os resultados teóricos com os experimentais. (Fernandes & Rodrigues, 1998).

A ocorrência de um comportamento não usual em relação ao escoamento tem sido observada para deformações em dois ou mais estágios. Amostras pré-deformadas quando submetidas a novos carregamentos de sentido ou natureza diferente podem apresentar transientes na curva tensão-deformação, não correspondendo mais às relações citadas acima.

Wagoner & Laukonis (1983) observaram que, durante um segundo estágio de deformação, chapas de aço acalmado ao alumínio pré-deformadas por laminação e no estado plano de deformação apresentaram curvas de escoamento com regiões de taxa de encruamento baixa ou negativa. A transição entre dois estados de deformação foi investigada também por Sillekens (1991). Combinando esforços de diferentes naturezas, este autor verificou que o material, além de apresentar menores taxas de encruamento, tinha seu comportamento tendendo para aquele correspondente ao último tipo de esforço aplicado.

Vieira & Fernandes (1995) estudaram os efeitos que uma múltipla alteração no caminho de deformação em chapas de cobre produziriam no encruamento do metal. Verificaram que o comportamento mecânico dependeria principalmente da orientação geométrica entre sucessivos carregamentos, e não tanto da ordem na qual o material havia sido processado. Esses fenômenos estariam associados a processos de recuperação dinâmica e conseqüente rearranjo na distribuição de discordâncias. A subestrutura do metal, assim como seu comportamento macroscópico, tenderia para aquela característica do último tipo de esforço aplicado. Wilson & Zandrahimi (1990) observaram que uma mudança na trajetória de deformação poderia levar a dois tipos de transientes no comportamento mecânico do metal. O aumento da taxa de encruamento estaria associado a uma reorientação das tensões internas. O segundo tipo, caracterizado por um decréscimo no encruamento, seria decorrente da dissolução da estrutura de discordâncias formada inicialmente. A magnitude e o comportamento dependeriam da sequência de deformação e do material utilizado.

Muitos processos de conformação mecânica envolvem, em diferentes magnitudes, variações na trajetória de deformação do material. Essas alterações podem estar relacionadas à natureza do próprio processo ou a modificações entre passes de deformação. Conforme observado anteriormente, o comportamento mecânico de metais trabalhados a frio submetidos posteriormente a outros esforços não estaria associado ao encruamento progressivo. Portanto, verifica-se a importância do estudo do tema para uma maior compreensão dos mecanismos de encruamento bem como o aproveitamento do fenômeno nos processos de conformação mecânica.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

Neste trabalho foram consideradas curvas de tração e torção monotônicas. As curvas de escoamento provenientes de alterações no caminho de deformação foram comparadas àquelas resultantes dos ensaios mecânicos convencionais. Para relacionar os dados obtidos nos ensaios de tração e torção, fez-se necessário transformar esses valores em tensão e deformação equivalentes (Dieter, 1984).

### **2.1 Material**

Foram utilizados dois materiais: aço baixo carbono (0,245%C; 0,407%Mn; 0,155%Si; 0,0076%S) e latão (61,31%Cu; 35,61%Zn; 0,316%Sn; 2,26%Pb).

### **2.2 Procedimento experimental**

As etapas do procedimento experimental podem ser observadas na Fig. 1. Foram realizados ensaios de tração e torção nos corpos de prova recozidos. Paralelamente, amostras pré-deformadas por tração foram submetidas a ensaios de torção e vice-versa. Por último, corpos de prova foram sujeitos a duas mudanças no caminho de deformação, alternando esforços de tração e torção.

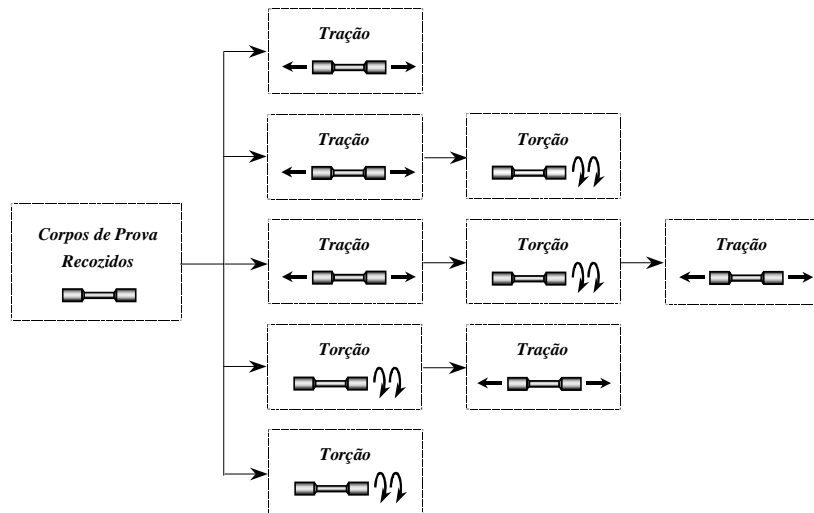


Figura 1 - Etapas do procedimento experimental.

### 2.3 Corpos de prova

Foram utilizados corpos de prova cujos formato e dimensões seriam adequados tanto aos ensaios de tração como aos ensaios de torção. O diâmetro e o comprimento da parte útil foram respectivamente 6,20mm e 44,70mm. Após a confecção, os corpos de prova de aço e latão foram recozidos à 1000°C durante 20 minutos em atmosfera à vácuo  $2 \times 10^{-4}$  e à 600°C durante 40 minutos em atmosfera de argônio, respectivamente.

### 2.4 Ensaios de tração

Os corpos de prova foram tracionados em uma máquina MTS com controle e aquisição de dados através do controlador TESTSTAR2. A taxa de deformação equivalente utilizada foi de  $6,34 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  para o aço e de  $6,31 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  para o latão.

### 2.5 Ensaios de torção

Os ensaios de torção foram realizados em uma máquina MTS com controle e aquisição de dados através do controlador TESTSTAR2, montada em uma bancada de torno. A velocidade de deformação equivalente foi a mesma utilizada nos ensaios de tração para os dois materiais, visto que uma alteração nessa poderia afetar o comportamento do metal em relação ao escoamento (Longo & Reed-Hill, 1970).

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Figuras 2, 3 e 4 são apresentadas curvas de escoamento à tração e à torção do aço acompanhadas de curvas obtidas a partir de alterações na trajetória de deformação do material. Verifica-se que uma pré-deformação por tração (Fig. 2), quando a amostra é avaliada por torção, resulta em um aumento na taxa de encruamento em relação ao material submetido apenas a esforços monotônicos. Corpos de prova deformados anteriormente em ensaios de torção, ao serem levados a ensaios de tração, apresentam curvas de escoamento tendendo para aquelas correspondentes aos últimos tipos de esforços aplicados, fato que se repete mediante duas mudanças no caminho de deformação (Figs. 3 e 4).

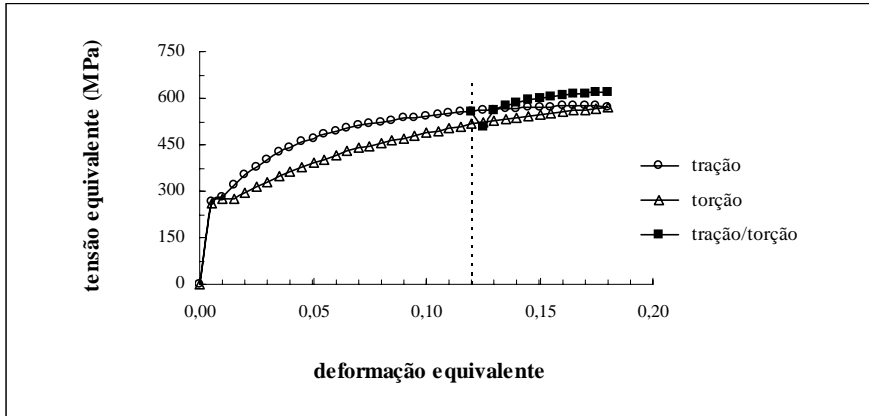


Figura 2 - Curvas tensão equivalente - deformação equivalente obtidas através de ensaios de tração, torção e tração seguida de torção para o aço.

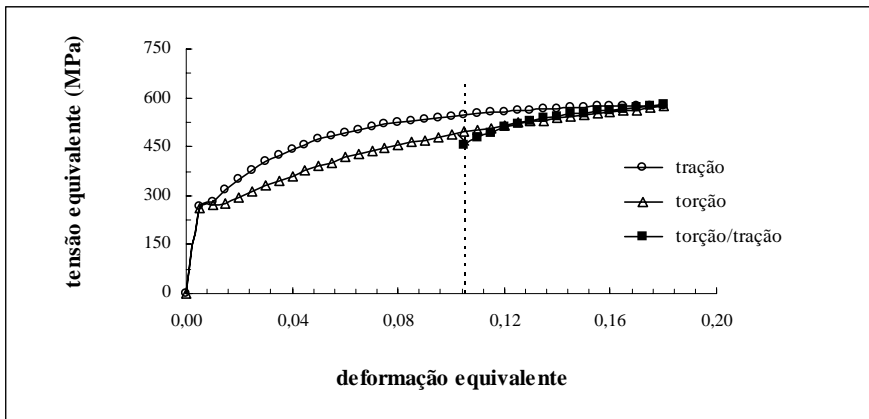


Figura 3 - Curvas tensão equivalente - deformação equivalente obtidas através de ensaios de tração, torção e torção seguida de tração para o aço.

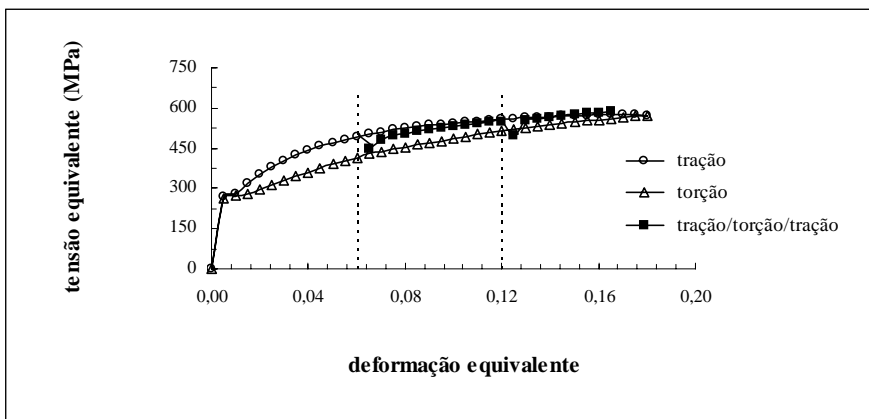


Figura 4 - Curvas tensão equivalente - deformação equivalente obtidas através de ensaios de tração, torção e tração seguida de torção seguida de tração para o aço.

Nas Figuras 5, 6 e 7 podem ser observados os resultados obtidos nos ensaios de tração e torção do latão. Percebe-se que, diferentemente do que ocorre para o aço, onde os comportamentos à torção e à tração tornam-se próximos na medida em que a deformação aumenta, estas duas curvas de escoamento tendem a se distanciar com a aplicação dos esforços.

Na Figura 5 é apresentada a curva de escoamento à torção de uma amostra pré-deformada por tração. Verifica-se a ocorrência de uma taxa de encruamento mais baixa do que aquela correspondente ao material deformado apenas por torção. Observa-se o oposto do que acontece com o aço, onde uma pré-deformação por torção resultou em um aumento da taxa de encruamento. A aplicação de esforços de torção em uma amostra de latão parece ter tido pouca influência no comportamento mecânico à tração ulterior, se comparada à curva de escoamento à tração padrão do material (Fig. 6). Na Fig. 7 pode ser observada a curva tensão-deformação correspondente a duas mudanças no caminho de deformação. Após ser deformada por tração seguida de torção, a amostra apresenta taxa de encruamento maior, o que não ocorre para o aço.

Dessa forma, fica evidenciado que o tipo de esforço aplicado e o material irão influenciar o comportamento mecânico em relação a variações no caminho de deformação.

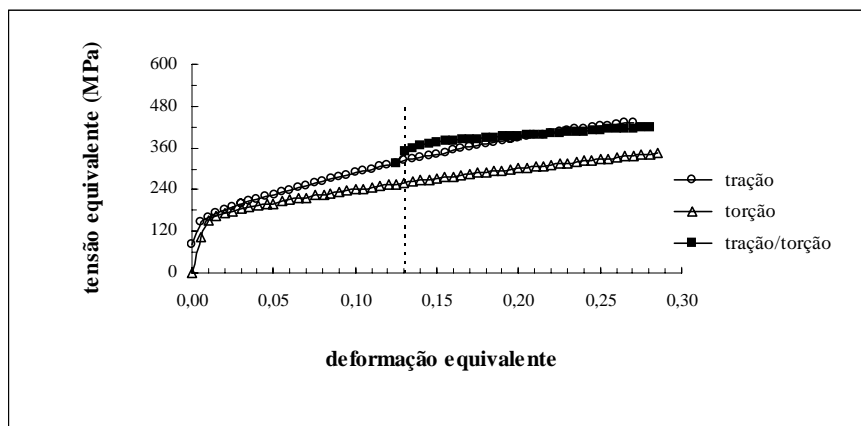


Figura 5 - Curvas tensão equivalente - deformação equivalente obtidas através de ensaios de tração, torção e tração seguida de torção para o latão.

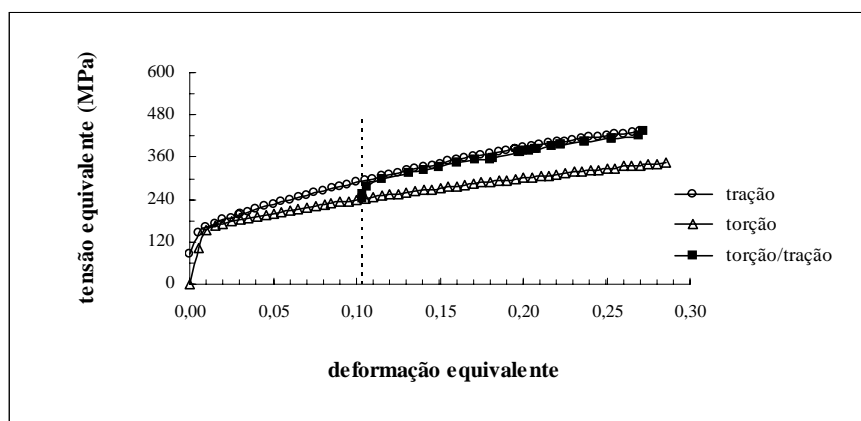


Figura 6 - Curvas tensão equivalente - deformação equivalente obtidas através de ensaios de tração, torção e torção seguida de tração para o latão.

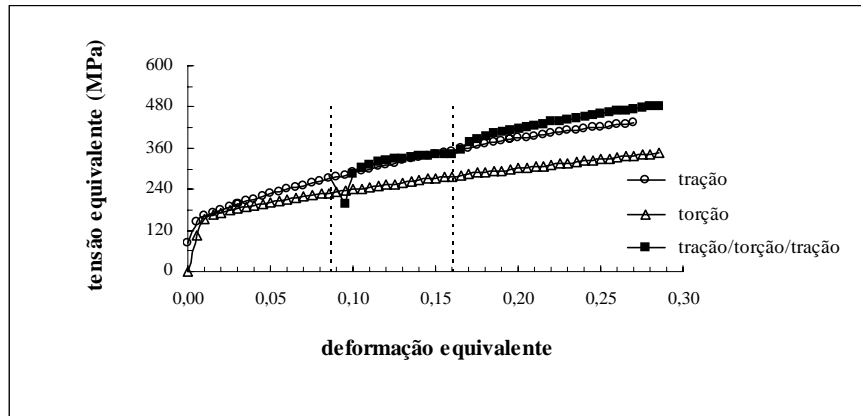


Figura 7 - Curvas tensão equivalente - deformação equivalente obtidas através de ensaios de tração, torção e tração seguida de torção seguida de tração para o latão.

#### 4. CONCLUSÕES

A maneira através da qual um metal é deformado é determinante em relação ao seu comportamento mecânico posterior. Uma variação no caminho de deformação pode resultar em um aumento ou em um decréscimo de sua taxa de encruamento, o que dependerá da natureza da deformação aplicada e do material utilizado.

No aço, ao mudar de esforços de tração para esforços de torção, observa-se aumento na taxa de encruamento, oposto do que ocorre para o latão. A outra sequência de operações de deformação apresentada, torção seguida de tração, não gerou resultados muito significativos.

#### *Agradecimentos*

Os autores agradecem ao CDTN/CNEN pelo recozimento dos corpos de prova, ao PRONEX, ao CNPQ e à FAPEMIG pelo apoio financeiro.

#### REFERÊNCIAS

- Dieter, G. E., 1984, *Workability Testing Techniques*, Carnes Publication Services,.
- Fernandes, J. V., Rodrigues, D. M., Menezes, L. F., Vieira, M. F., 1998, A Modified Swift Law for Prestrained Materials, *International Journal of Plasticity*, vol. 14, n. 6, pp. 537-550.
- Longo, W. P., Reed-Hill, R. E., 1970, Work Softening in Polycrystalline Metals, *Scripta Metallurgica*, vol. 4, n. 10, pp. 765-770.
- Wagoner, R. H., Laukonis, J. V., 1983, Plastic Behavior of Aluminum-Killed Steel Following Plane-Strain Deformation, *Metallurgical Transactions*, vol. 14A, pp. 1487-1495.
- Sillekens, W. H., Dautzenberg, J. H., Kals, J., 1991, Strain Path Dependence of Flow Curves, *Annals of the CIRP*, vol. 40, pp. 255-258.
- Vieira, M. F., Fernandes, J. V., 1995, Plastic Behavior of Copper Sheets Subjected to a Double Strain-Path Change, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 47, pp. 261-272.

Wilson, D. V., Zandrahimi, M., Roberts, W. T., 1990, Effects of Changes in Strain Path on Work-Hardening in CP Aluminium and na Al-Cu-Mg Alloy, Acta Metallurgica, vol. 38, n. 2, pp. 215-226.

## **ABSTRACT**

### **EFFECT OF THE STRAIN PATH IN THE STRAIN HARDENING OF THE STEEL AND BRASS DEFORMED IN TENSION AND TORSION.**

The mechanical behavior of a metal depends not only of the process parameters, but also on the strain path. Under deformation conditions that results in changes in the strain path, transients can occur in the strain-hardening rate, leading to softening or hardening. During industrial processes changes can occur in the strain path, so it is interesting to study the plastic flow in these conditions. Stress-strain curves involving abrupt changes in the strain path are presented in this paper. These curves are compared with those resulting from monotonic tension and torsion tests. Two materials were used: low carbon steel and brass. Different behaviors were observed according to the type of deformation and the material.

***Key-words:*** *Strain path, Tension, Torsion, Mechanical properties*