

# ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE O COEFICIENTE DE DEFORMAÇÃO REDUNDANTE E O PARÂMETRO GEOMÉTRICO $\Delta$ DE BARRAS DE ALUMÍNIO E COBRE TREFILADAS<sup>1</sup>

*Elaine Carballo Siqueira Corrêa<sup>2</sup>*

*Maria Teresa Paulino Aguiar<sup>3</sup>*

*Paulo Roberto Cetlin<sup>3</sup>*

## **Resumo**

Neste trabalho, a relação entre o coeficiente de deformação redundante  $\phi$  e o parâmetro geométrico  $\Delta$  para barras de alumínio e cobre trefiladas em um passe foi avaliada. A técnica experimental de superposição das curvas tensão-deformação foi utilizada na análise, envolvendo seis condições de operação, produto de duas reduções de área e três semi-ângulos de feira. Os dados obtidos foram comparados àqueles anteriormente determinados através do método de visioelasticidade. Os resultados evidenciaram a influência das características estruturais dos metais no processo, possibilitando a discussão dos efeitos da deformação prévia de natureza distinta no comportamento subsequente dos mesmos e ainda indicando as limitações da técnica clássica de cálculo da deformação média na trefilação.

**Palavras-chave:** Trefilação; Coeficiente de deformação redundante; Parâmetro  $\Delta$

## **ANALYSIS OF THE RELATIONSHIP BETWEEN THE REDUNDANT DEFORMATION FACTOR AND THE PARAMETER $\Delta$ OF DRAWN ALUMINUM AND COPPER BARS**

### **Abstract**

In this paper, the relationship between the redundant deformation factor and the parameter  $\Delta$  for single-pass drawn aluminum and copper bars has been investigated through the stress-strain curves superposition technique. Six operation conditions have been used in the experiments, involving two area reductions and three die semi-angles. The values of the redundant deformation factor have been compared to those previously calculated through the visioelasticity method. The results showed the influence of the structural features of the metal on the process, allowing the analysis of the effects of strain path changes on the subsequent work hardening behavior of drawn bars and revealing the limitations of the classical experimental technique for calculating the average deformation in the forming operation.

**Key words:** Drawing; Redundant deformation factor; Parameter  $\Delta$

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.*

<sup>2</sup> *Dr., Bolsista de Pós - Doutorado do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais - UFMG, BH - MG. elaine@demet.ufmg.br*

<sup>3</sup> *Dr., Professor do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção - UFMG, BH - MG.*

## 1 INTRODUÇÃO

A trefilação é um processo de conformação mecânica no qual o metal é forçado a passar através de uma matriz cônica, resultando na redução da área de sua seção transversal e no aumento de seu comprimento. Durante a operação, o material sofre uma espécie de cisalhamento interno, que em nada contribui para as alterações nas dimensões do mesmo, dando origem, entretanto, à chamada deformação redundante.<sup>(1)</sup> Essa parcela de deformação, que em conjunto com a deformação externa ou geométrica  $\varepsilon$  constitui a deformação efetiva na trefilação, é decrescente da superfície para o centro da peça, podendo levar à ocorrência de perfis de deformação heterogêneos em materiais trefilados.

Dentro do estudo da trefilação, além de avaliar a distribuição de deformação ao longo da seção transversal das amostras, é comum utilizar o chamado coeficiente de deformação redundante  $\phi$ , determinado a partir do cálculo da deformação média  $\varepsilon_m$  na operação, segundo a equação 1.<sup>(2-4)</sup> A relevância do mesmo está associada à possibilidade de previsão das tensões envolvidas no processo e do comportamento da peça após o mesmo, a partir das características estruturais do metal, das condições de atrito e dos parâmetros geométricos da operação.

$$\phi = \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon} \quad (1)$$

Diversos métodos vêm sendo investigados para a obtenção do valor da deformação média na trefilação.<sup>(2-8)</sup> A técnica experimental de superposição das curvas tensão-deformação, tema deste trabalho, foi proposta por Hill e Tupper<sup>(9)</sup> e utilizada posteriormente por Caddell e Atkins,<sup>(4)</sup> formulada a partir de um trabalho cujo enfoque era a determinação teórica da tensão de trefilação. Nesta análise, supôs-se que o limite de escoamento da barra trefilada equivaleria a um valor de tensão na curva do material recozido cuja deformação corresponderia à deformação efetiva ou média da trefilação. Em outras palavras, a partir da comparação ou superposição das curvas obtidas em testes de tração das amostras recozida e trefilada, poderia ser determinada a deformação média, conforme a Figura 1. Diversas simplificações foram impostas ao processo, como atrito nulo e perda de energia devido ao aquecimento desprezível, sendo considerado ainda que as curvas de escoamento dos metais recozido e trefilado coincidiriam a partir do valor de deformação média e que os resultados seriam independentes do material em análise, importando apenas os aspectos geométricos da fiação (semi-ângulo e redução de área).

Dentro deste contexto, neste trabalho a deformação média e a relação entre o coeficiente de deformação redundante e o parâmetro geométrico  $\Delta$  de barras de cobre e alumínio trefiladas em um passe foram avaliadas através da técnica de superposição das curvas tensão-deformação e os resultados foram comparados àqueles previamente obtidos através de outro método experimental, a viscoplasticidade.

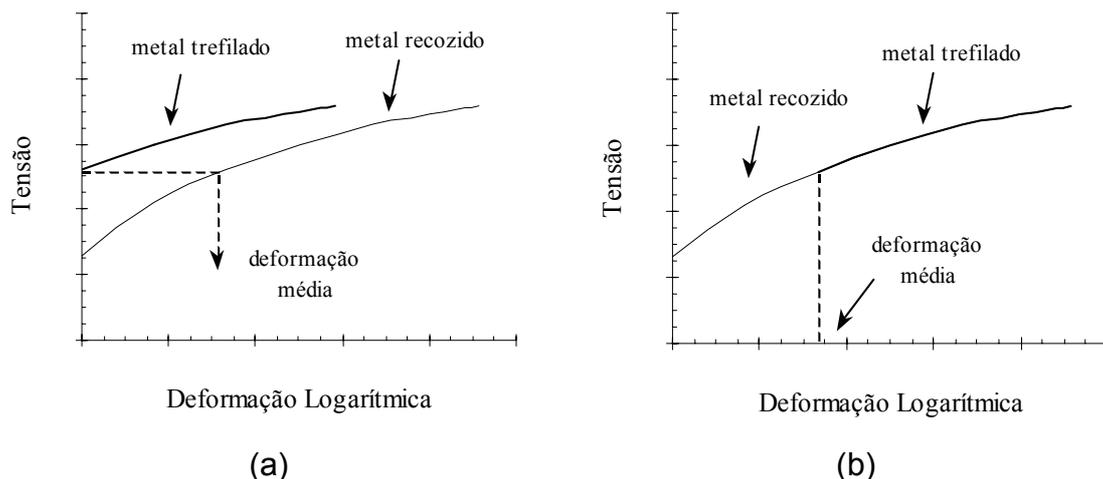


Figura 1 - Representação esquemática da técnica de superposição das curvas tensão - deformação.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

**Material** - Foram utilizados dois metais neste trabalho, cobre e alumínio, cuja composição química (% em peso) é apresentada na Tabela 1.

**Corpos de Prova** - Dois tipos de corpos de prova foram confeccionados, projetados de acordo com os experimentos a serem conduzidos. O primeiro, relativo à obtenção da curva de escoamento dos metais recozidos, consistiu em peças de seção transversal circular com diâmetro útil de 10 mm e comprimento útil de 60 mm. O segundo grupo, associado ao comportamento à tração dos materiais trefilados, apresentou uma geometria especial, empregada com o objetivo de evitar a possível ruptura da barra conformada dentro das garras durante o ensaio mecânico subsequente. Neste caso, além do apontamento, regiões com área de seção transversal superior àquela da parte útil da amostra foram utilizadas, sofrendo uma maior redução de área na trefilação, ficando mais encruadas e servindo para a fixação do corpo de prova à máquina de tração. Os valores de diâmetro e de comprimento úteis iniciais das barras variaram de acordo com os parâmetros de processamento, de forma que, ao fim operação de trefilação, fossem 10 mm e 40 mm, respectivamente. Após a usinagem, todas as peças foram recozidas nas seguintes condições: 570°C durante 5400 s (cobre) e 400°C durante 3600 s (alumínio).

Tabela 1 - Composição química (% em peso) das barras de cobre e alumínio utilizadas no trabalho.

|    | cobre  |    | alumínio |
|----|--------|----|----------|
| Sn | <0,010 | Mg | 0,373    |
| Pb | 0,018  | Si | 0,270    |
| Fe | 0,010  | Fe | 0,123    |
| Zn | 0,012  | Cu | 0,011    |
| Al | 0,049  | Mn | 0,032    |

**Trefilação** - A trefilação das peças foi conduzida em um passe a uma velocidade de  $1,67 \times 10^{-1}$  mm/s em uma máquina de ensaios mecânicos Instron modelo 5582 especialmente adaptada para o processo. Seis condições de operação foram avaliadas, envolvendo três semi-ângulos de fiação  $\alpha$  e duas reduções de área  $r$ . Na Tabela 2 podem ser observados esses dados, assim como os valores de deformação externa e parâmetro geométrico  $\Delta$ , que associa  $\alpha$  e  $r$ , calculado através

da equação 2.<sup>(4)</sup> Antes dos testes, todas as amostras foram lubrificadas com bissulfeto de molibdênio.

**Tabela 2** – Condições de trefilação: semi-ângulo de fieira  $\alpha$ , redução de área  $r$ , deformação externa  $\varepsilon$  e parâmetro geométrico  $\Delta$ .

| semi-ângulo de fieira $\alpha$ | redução de área $r$ | deformação externa $\varepsilon$ | parâmetro geométrico $\Delta$ |
|--------------------------------|---------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| 20°                            | 8%                  | 0,083                            | 16,75                         |
| 20°                            | 15%                 | 0,163                            | 8,60                          |
| 8°                             | 8%                  | 0,083                            | 6,7                           |
| 8°                             | 15%                 | 0,163                            | 3,44                          |
| 3°                             | 8%                  | 0,083                            | 2,51                          |
| 3°                             | 15%                 | 0,163                            | 1,29                          |

$$\Delta = \frac{d_i + d_f}{d_i - d_f} \operatorname{sen} \alpha \quad (2)$$

Onde  $d_i$  e  $d_f$  são os diâmetros inicial e final da barra trefilada.

**Tração** - Os testes de tração também foram realizados em uma máquina Instron modelo 5582 com extensômetro eletrônico modelo 2630-100. A velocidade do equipamento foi de  $6,67 \times 10^{-2}$  mm/s, resultando em taxas de deformação iniciais de  $1,1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  (metais recozidos) e  $1,7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  (barras trefiladas). Todos os experimentos foram conduzidos até a ruptura das peças.

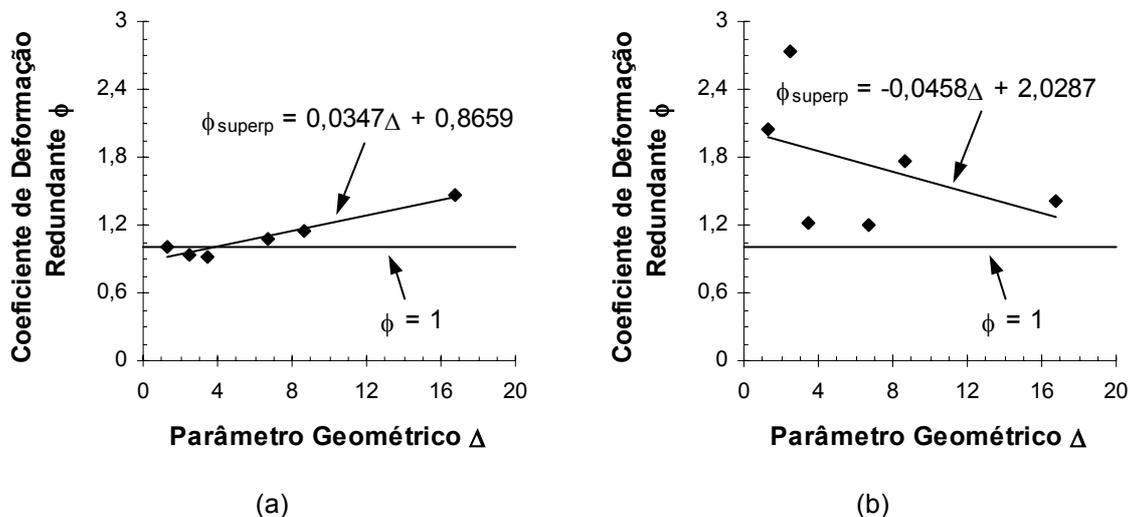
### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 3 são apresentados os resultados de deformação média para o cobre e o alumínio trefilados  $\varepsilon_{\text{msuperp}}$  obtidos através da técnica de superposição das curvas tensão-deformação, assim como os valores de coeficiente de deformação redundante  $\phi_{\text{superp}}$  determinados a partir dos mesmos e da equação 2. Na Figura 1 podem ser observados esses dados associados ao parâmetro geométrico  $\Delta$  de cada condição de operação, acompanhados de uma expressão descrevendo o comportamento geral dos mesmos. Neste caso, para ambos metais, uma relação linear entre  $\phi$  e  $\Delta$  foi estabelecida.

O exame geral dos gráficos revela a influência das características estruturais do material em estudo na variação do coeficiente de deformação redundante com o parâmetro geométrico. Observa-se que o cobre apresenta uma relação crescente entre  $\phi_{\text{superp}}$  e  $\Delta$ , similarmente a outros trabalhos da literatura, desenvolvidos com a mesma técnica experimental ou não.<sup>(2-5,7)</sup> Por outro lado, os valores de  $\phi_{\text{superp}}$  determinados para as amostras de alumínio parecem diminuir com o aumento de  $\Delta$ , fenômeno que não havia sido observado anteriormente. Em adição a essas diferenças de comportamento, um outro fato destaca-se nos dados mostrados na Figura 2: para o cobre, considerando  $\Delta$  igual a 2,51 e 3,44, verifica-se que os valores de coeficiente de deformação redundante são inferiores a 1, resultado questionável no processo de conformação, uma vez que significa uma deformação média inferior à deformação externa na peça.

**Tabela 3** - Deformação média  $\varepsilon_{msuperp}$  e coeficiente de deformação redundante  $\phi_{superp}$  das barras de cobre e alumínio trefiladas em um passe obtidos através da técnica de superposição das curvas tensão-deformação.

| condição de trefilação        | cobre                   |                 | alumínio                |                 |
|-------------------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|
|                               | $\varepsilon_{msuperp}$ | $\phi_{superp}$ | $\varepsilon_{msuperp}$ | $\phi_{superp}$ |
| $\alpha = 20^\circ, r = 8\%$  | 0,123                   | 1,469           | 0,118                   | 1,409           |
| $\alpha = 20^\circ, r = 15\%$ | 0,188                   | 1,156           | 0,287                   | 1,764           |
| $\alpha = 8^\circ, r = 8\%$   | 0,090                   | 1,079           | 0,100                   | 1,205           |
| $\alpha = 8^\circ, r = 15\%$  | 0,149                   | 0,918           | 0,197                   | 1,211           |
| $\alpha = 3^\circ, r = 8\%$   | 0,078                   | 0,932           | 0,229                   | 2,741           |
| $\alpha = 3^\circ, r = 15\%$  | 0,163                   | 1,005           | 0,332                   | 2,045           |



**Figura 1** – Relação entre o coeficiente de deformação redundante obtido através da técnica de superposição das curvas tensão-deformação  $\phi_{superp}$  e o parâmetro geométrico  $\Delta$ : (a) cobre e (b) alumínio.

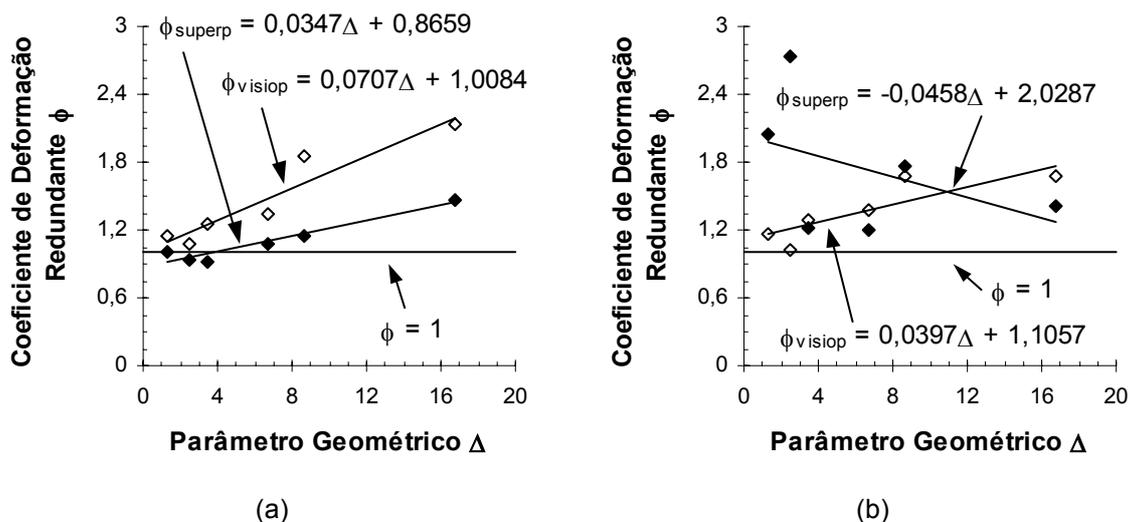
Conforme mencionado previamente, a deformação na trefilação é composta de duas parcelas, que somadas levam à deformação efetiva na operação. A primeira é a deformação homogênea ou externa do metal  $\varepsilon$ , correspondente à alteração geométrica do mesmo no processo. A outra é associada à ocorrência dos esforços cisalhantes durante a passagem do material pela fiação, ou seja, trata-se da deformação redundante. Ainda que esta última fosse nula e apenas a deformação externa fosse observada, o valor de  $\phi$  seria igual a 1. Portanto, espera-se que os resultados de coeficiente de deformação redundante sejam iguais (ou levemente superiores) a 1 para as condições nas quais a combinação do semi-ângulo de fiação e da redução de área leve à ocorrência da deformação redundante de maneira menos acentuada e para as situações opostas, consideravelmente superior a 1.

Dessa forma, os resultados exibidos na Tabela 3 e na Figura 2 evidenciam as limitações do uso da técnica clássica de superposição das curvas tensão-deformação na determinação da deformação média na trefilação. Uma possível explicação para os dados apresentados estaria associada ao princípio do procedimento utilizado. A obtenção de  $\varepsilon_{msuperp}$  no processo (e conseqüentemente de  $\phi_{superp}$ ) é realizada a partir da comparação entre as curvas de tração das barras recozida e trefilada: a tensão de escoamento da última seria equivalente a um determinado valor na curva de tração do metal não conformado correspondente a

$\varepsilon_{msuperp}$  (Figura 1). Deste modo, o método é baseado no comportamento mecânico subsequente da amostra previamente processada, ou seja, na resposta inicial do material submetido a uma mudança no caminho de deformação de trefilação para tração.

Diversos trabalhos conduzidos anteriormente mostraram a importância da análise do caminho de deformação no encruamento de materiais processados em dois ou mais estágios, fenômeno investigado especialmente em operações associadas ao processamento de chapas e ensaios mecânicos usuais.<sup>(10-16)</sup> Os experimentos revelaram que, dentre outros resultados, as tensões iniciais de fluxo durante o recarregamento são um dos fatores mais afetados após uma alteração na trajetória de deformação. Neste sentido, poderiam ser observados dois tipos de comportamento em comparação com os dados do metal deformado apenas monotonicamente: tensão de escoamento inferior associada a uma taxa de encruamento superior ou tensão de escoamento superior acompanhada de taxa de encruamento inferior (ou negativa). O tipo de resposta dependeria de diversos fatores, tais como a magnitude da mudança do caminho de deformação, o valor da pré-deformação e as características estruturais do material em análise. Portanto, voltando aos dados exibidos na Figura 2, tanto a ocorrência de valores de coeficiente de deformação redundante inferiores a 1 como as diferenças de comportamento observadas para os dois metais podem ser resultado, pelo menos parcialmente, da mudança no caminho de deformação de trefilação para tração. Em relação ao primeiro fenômeno,  $\phi_{superp} < 1$ , a aplicação de esforços de tração no cobre pré-trefilado nas condições já mencionadas levaria à ocorrência de uma tensão de escoamento inferior àquela relativa ao material inicialmente recozido. Para as demais combinações de semi-ângulo de fieira e redução de área, nas quais  $\phi_{superp} > 1$ , cabe ressaltar que os esforços cisalhantes na trefilação aparecem de forma distinta de acordo com  $\alpha$  e  $r$ . Deste modo, diferentes magnitudes de alterações na trajetória de deformação de trefilação para tração podem ser observados em função destas variáveis e, como citado anteriormente, a magnitude da mudança do caminho de deformação, assim como as características do metal em estudo, irá afetar o tipo de resposta do material.

Na Figura 3 podem ser observados novamente os resultados de  $\phi \times \Delta$  obtidos através da técnica de superposição das curvas tensão-deformação acompanhados dos resultados calculados para os mesmos materiais e condições de trefilação pelo método de visioelasticidade.<sup>(17)</sup> Verifica-se que, para o cobre, para todas as condições de operação, os valores de  $\phi_{visiop}$  são superiores aos de  $\phi_{superp}$ . Já para o alumínio, a diferença entre as duas abordagens irá depender do parâmetro geométrico  $\Delta$ . Diferentemente de  $\phi_{superp}$ , o coeficiente de deformação redundante determinado através de visioelasticidade apresenta o mesmo comportamento em relação a  $\Delta$  para os dois metais, incluindo resultados similares para as situações nas quais  $\Delta < 7$ . Dessa forma, visto que o método de visioelasticidade, além de possibilitar o estudo detalhado do escoamento do metal, é considerado aquele que representa a solução mais próxima da real para a análise do seu comportamento em diversas operações,<sup>(18-20)</sup> os efeitos de caminho de deformação são confirmados na técnica de superposição das curvas tensão-deformação.



**Figura 3** – Comparação entre os resultados  $\phi \times \Delta$  obtidos através das técnicas de superposição das curvas tensão-deformação ( $\phi_{\text{superp}}$ ) e visioelasticidade ( $\phi_{\text{visiop}}$ ).<sup>(17)</sup> (a) cobre e (b) alumínio.

## 4 CONCLUSÕES

- Utilizando a técnica de superposição das curvas tensão-deformação, o cobre apresentou uma relação crescente entre o coeficiente de deformação redundante  $\phi$  e o parâmetro  $\Delta$ , oposto do que foi obtido para o alumínio. Valores de  $\phi$  inferiores a 1 foram observados nos resultados do cobre para algumas condições de trefilação.
- Resultados distintos de coeficiente de deformação redundante foram determinados através dos métodos de superposição das curvas tensão-deformação e de visioelasticidade.
- A técnica de superposição das curvas tensão-deformação pode levar a resultados questionáveis de deformação média e coeficiente de deformação redundante na trefilação, representando, entretanto, um indicativo do encruamento do metal submetido a uma mudança no caminho de deformação.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro ao trabalho e à Belgo Mineira Bekaert Artefatos pela doação das feiras de trefilação.

## REFERÊNCIAS

- 1 JOHNSON, R.W., ROWE, G.W. Redundant Work in Drawing Cylindrical Stock. *Journal of the Institute of Metals*, v. 96, p. 97-105, 1968.
- 2 CETLIN, P.R. Redundant Deformation Factor Evaluation Through the Stress-Strain Curves Superposition Method in Round Section Bar Drawing – A Literature Analysis. *Journal of Engineering Materials and Technology*, v. 109, p. 272-275, October 1987.
- 3 CETLIN, P.R., MARCOS., J.L.N. Redundant Deformation Factor Evaluation Through the Stress-Strain Curves Superposition Method in Round Section Bar Drawing – Experimental Results. *Journal of Engineering Materials and Technology*, v. 109, p. 276-281, October 1987.
- 4 CADDELL, R.M., ATKINS, A.G. The Influence of Redundant Work When Drawing

- Rods Through Conical Dies. *Journal of Engineering for Industry*, p. 411-419, May 1968.
- 5 BACKOFEN, W.A. *Deformation Processing*. 1 ed. Massachusetts: Addison Wesley Reading, 1972. 326p.
  - 6 SADOK, L., PACKO, M. Application of Numerical Techniques to the Analysis of Strains in the Drawing Process. *Steel Research*, v. 60, n. 8, p. 351-355, 1989.
  - 7 CETLIN, P.R. Redundant Deformation Factor Evaluation Through the Hardness Profile Method in Round Section Bar Drawing. *Journal of Engineering Materials and Technology*, v. 106, p. 147-151, April 1984.
  - 8 GIFFORD, R.B., BANDAR, A.R., MISIOLEK, W.Z., COULTER, J.P. A Numerical Investigation of the Wire Drawing Process. In: *8<sup>th</sup> International Conference on Metal Forming - Metal Forming*, 2000, Cracóvia. *Anais...* p. 597-604.
  - 9 HILL, R., TUPPER, S.J. A New Theory of the Plastic Deformation in Wire Drawing. *Journal of the Iron and Steel Institute*, v. 158, p. 353-359, 1948.
  - 10 WAGONER, R.H., LAUKONIS, J.V. Plastic Behavior of Aluminum-Killed Steel Following Plane-Strain Deformation. *Metallurgical Transactions*, v. 14A, p. 1487-1495, July 1983.
  - 11 DOUCET, A.B., WAGONER, R.H. Transient Tensile Behavior of Interstitial-Free Steel and 70/30 Brass Following Plane-Strain Deformation. *Metallurgical Transactions*, v. 20A, p. 1483-1493, August 1989.
  - 12 WILSON, D.V., ZANDRAHIMI, M., ROBERTS, W.T. Effects of Changes in Strain Path on Work Hardening in Cp Aluminium and an Al-Cu-Mg Alloy. *Acta Metallurgica et Materialia*, v. 38, n. 2, p. 215-226, 1990.
  - 13 FERNANDES, J.V., VIEIRA, M.F. Strain Distribution in Copper Tensile Specimens Prestrained in Rolling. *Metallurgical and Materials Transactions*, v. 28A, p. 1169-1178, May 1997.
  - 14 KUSNIERZ, J., KUROWSKI, M., BALIGA, W. Strain Softening Effects in Microstructure of Twisted Pre-Deformed Copper Rods. *Materials Chemistry and Physics*, v. 81, p. 548-551, 2003.
  - 15 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
  - 16 BARLAT, F., FERREIRA DUARTE, J.M., GRACIO, J.J., LOPES, A.B., RAUCH, E.F. Plastic Flow for Non-Monotonic Loading Conditions of an Aluminum Alloy Sheet Sample. *International Journal of Plasticity*, v. 19, p. 1215-1244, 2003.
  - 17 CORRÊA, E.C.S., AGUILAR, M.T.P., CETLIN, P.R. Avaliação Experimental da Deformação em Barras de Cobre e Alumínio Trefiladas. In: *17º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais CBECIMAT*, 2006, Foz do Iguaçu. *Anais...* p. 1-12 (Anais em Preparação).
  - 18 THOMSEN, E.G., YANG, C.T., KOBAYASHI, S. *Mechanics of Plastic Deformation in Metal Processing*. 1 ed. New York: The Macmillan Company, 1965. 486p.
  - 19 SHABAIK, A., THOMSEN, E.G. Some Additional Studies of the Mechanics of Axisymmetric Extrusions by the Visioplasticity Method. *Annals of the International Institution for Production Research - CIRP*, v. XVI, p. 41-48, 1968.
  - 20 ROWE, G.W. *Principles of Industrial Metal Working Processes*. 4 ed. London: Edward Arnold, 1977. 407p.