

ANÁLISE DA DEFORMAÇÃO RESIDUAL UNIFORME DE BARRAS DE COBRE E ALUMÍNIO TREFILADAS EM UM PASSE¹

*Elaine Carballo Siqueira Corrêa²
Maria Teresa Paulino Aguiar³
Paulo Roberto Cetlin⁴*

Resumo

Neste trabalho, foi analisada a possibilidade de prever a ductilidade de barras de cobre e alumínio previamente trefiladas em um passe a partir do comportamento mecânico dos metais recozidos. Foram consideradas nove condições de operação, combinação de três semi-ângulos de fiação e três reduções de área. Testes de tração foram realizados nos metais trefilados, levando à obtenção dos valores de alongamento e, conseqüentemente, de deformação uniforme. Ensaios similares foram conduzidos nos materiais recozidos. Um modelo teórico para a determinação da deformação residual, foi apresentado, elaborado a partir dos dados do material recozido, e confrontado com os resultados obtidos experimentalmente. O modelo exibiu dados distintos daqueles obtidos experimentalmente, inferiores ou superiores, de acordo com o metal e as condições de trefilação, mesmo substituindo a deformação externa pela deformação média na trefilação, indicando que outros fatores devem ser considerados na previsão do comportamento mecânico dos metais.

Palavras-chave: Trefilação; Tração; Deformação residual uniforme.

ANALYSIS OF THE RESIDUAL UNIFORM STRAIN IN SINGLE-PASS DRAWN COPPER AND ALUMINUM BARS

Abstract

In the present work, the prediction of the ductility of single pass drawn copper and aluminum bars was evaluated based on the mechanical behavior of annealed samples. Several drawing conditions were used in the analysis, involving three die semi-angles and three reductions of area. Tensile tests were conducted in the bars, allowing the calculation of the elongation and, consequently, the uniform strain. Similar tests were performed in the annealed specimens. A theoretical model for predicting the residual uniform strain was presented and the results were compared to those obtained through the experiments. Even considering the average deformation in drawing as the prestraining value, differences between the theoretical and the experimental results were observed, suggesting that other factors have to be considered in the analysis.

Key-words: Drawing; Tension; Residual uniform strain.

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

² *Dr., Professor do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFETMG, BH - MG. elaine@deii.cefetmg.br*

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

⁴ *Dr., Professor do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais - UFMG, BH - MG.*

1 INTRODUÇÃO

A trefilação é um processo de conformação mecânica a frio 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. Essa parcela de deformação, que em conjunto com a deformação externa ou geométrica constitui a deformação efetiva na trefilação, é decrescente da superfície para o centro da peça, podendo levar à ocorrência de perfis de deformação heterogêneos ao final do processo.⁽¹⁻⁵⁾ Em geral, associada a essa distribuição não uniforme de deformação, verifica-se também heterogeneidade nas propriedades mecânicas ulteriores do material trefilado,^(3,5,6) fenômeno que poderá influenciar tanto na aplicação final da peça como em etapas de processamento subseqüentes a serem realizadas, também por trefilação ou através de outras operações de fabricação.

Alguns trabalhos foram conduzidos com o objetivo de estimar as propriedades mecânicas de metais trefilados, como o limite de resistência e o alongamento total^(1,7-9). Uma previsão adequada do comportamento dos materiais submetidos à operação, entretanto, deve considerar a ocorrência de deformação heterogênea ao longo da seção transversal da barra trefilada.

Dentro deste contexto, neste trabalho é analisada a possibilidade de prever a ductilidade de barras de cobre e alumínio previamente trefiladas através da avaliação de um modelo teórico para a determinação da deformação residual uniforme comparando o mesmo com resultados experimentais, considerando a ocorrência da deformação não homogênea na operação de conformação.

2. Materiais e Métodos

2.1 Materiais e Corpos de Prova

Foram empregadas no presente trabalho barras de cobre e alumínio, cujas composições químicas (% em peso) são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química (% em peso) das barras de cobre e alumínio.

	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

Dois tipos de corpos de prova foram utilizados no trabalho. O primeiro, associado apenas a testes de tração, apresentou 10 mm e 60 mm de diâmetro e comprimento úteis, respectivamente. O segundo tipo, a ser trefilado e posteriormente tracionado, foi projetado de forma que, após a operação de conformação mecânica, o diâmetro útil da amostra seria de 10 mm. Neste caso, além do apontamento, regiões com área de seção transversal superior àquela da parte útil da peça 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. Por fim, o comprimento útil da peça a ser trefilada foi determinado de maneira que, após a operação, a região útil do corpo de prova para a tração seria de 40,00 mm.

Após a confecção por usinagem, os corpos de prova foram recozidos a 570°C durante 5.400 s (cobre) e a 400°C durante 3.600 s (alumínio). Por fim, as peças a serem trefiladas foram jateadas com microesferas de vidro para facilitar a lubrificação durante o processo de conformação.

2.2 Trefilação

A trefilação dos corpos de prova foi conduzida em uma máquina de ensaios mecânicos Instron modelo 5582 com sistema de controle e aquisição de dados Merlin. Foram empregadas nove condições de operação, combinando três semi-ângulos de fieira α e três reduções de área r , cujos detalhes são exibidos na Tabela 2. Os experimentos foram realizados a uma velocidade de $1,67 \times 10^{-1}$ mm/s, gerando taxas de deformação de $3,34 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ a $2,46 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, determinadas de acordo com os valores de α e r . A lubrificação no processo foi conduzida com bissulfeto de molibdênio.

Tabela 2 – Condições de trefilação: semi-ângulo de fieira α , redução de área r e deformação externa ϵ .

condição de Trefilação	semi-ângulo de fieira α	redução de área r	deformação externa ϵ_{et}
1	20°	3%	0,031
2	20°	8%	0,083
3	20°	15%	0,163
4	8°	3%	0,031
5	8°	8%	0,083
6	8°	15%	0,163
7	3°	3%	0,031
8	3°	8%	0,083
9	3°	15%	0,163

2.3 Tração

A tração dos corpos de prova recozidos e trefilados foi realizada também em uma máquina de ensaios Instron modelo 5582 com sistema de controle e aquisição de dados Merlin e extensômetro eletrônico modelo 2630-100. Os ensaios foram conduzidos a uma velocidade 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 $1,7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ (metais trefilados). Após os testes, curvas tensão convencional - deformação convencional foram elaboradas para cada situação avaliada (peças recozidas e trefiladas nas diversas condições) e, a partir das mesmas, foram determinados os valores de alongamento uniforme, correspondendo aos resultados de deformação plástica convencional até a carga máxima. Em seguida, estes dados foram convertidos em valores de deformação real.

2.4 Modelo para a Análise da Deformação Residual Uniforme

Na Figura 1 pode ser observada uma representação esquemática de um modelo para o cálculo da deformação residual uniforme ϵ_{ur} do material trefilado, que

serviria como um indicativo da ductilidade do mesmo após a operação de conformação. O modelo é baseado em um trabalho originalmente desenvolvido para duas ligas metálicas submetidas a testes de tração seqüenciais com alteração de 90° entre os sentidos de aplicação dos esforços ⁽¹⁰⁾. ϵ_{eu} representa a deformação uniforme exibida pelo metal recozido. Supondo que uma amostra do referido material seja tracionada até um determinado valor ϵ_{et} (pré-deformação), descarregada e novamente submetida ao teste de tração, a deformação neste segundo experimento deveria ser equivalente à deformação residual uniforme ϵ_{ur} , conforme a equação mostrada no gráfico da Figura 1(a). Em outras palavras, a deformação uniforme de um metal previamente deformado seria análoga à deformação uniforme do mesmo recozido subtraída do valor de deformação aplicado no primeiro estágio de processamento. A representação gráfica da relação mencionada é exibida na Figura 1(b).

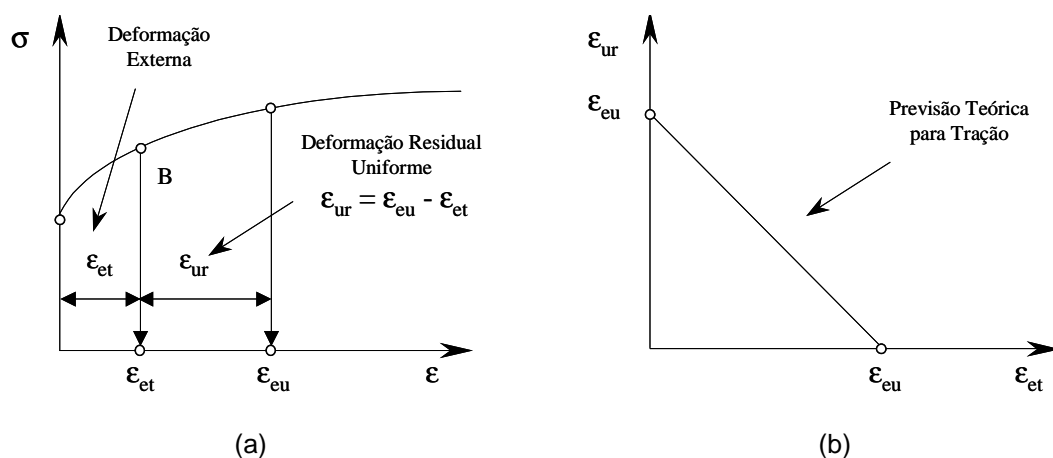


Figura 1 - Representação esquemática do modelo para análise da deformação residual uniforme de metais previamente processados: (a) curva tensão-deformação e (b) curva deformação uniforme-pré-deformação.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Tabelas 3 e 4 são apresentados os resultados de deformação uniforme ϵ_u e deformação residual uniforme ϵ_{ur} determinados experimentalmente para as barras de cobre e alumínio recozidas e trefiladas, respectivamente. Em seguida, na Figura 2, são exibidos gráficos similares àquele da Figura 1(a), nos quais podem ser observadas as representações do modelo para previsão da ductilidade previamente descrito, elaboradas com os valores de deformação uniforme dos metais recozidos, e os dados relativos às peças trefiladas superpostos nas mesmas. Neste caso, os valores de pré-deformação considerados foram aqueles exibidos na tabela 2 como deformações externas na trefilação para cada condição de processamento. Por fim, nota-se que, com o objetivo de facilitar a comparação entre os dois materiais empregados, os resultados experimentais foram divididos por ϵ_u .

Tabela 3 – Valores de deformação uniforme determinados nos testes de tração dos metais recozidos.

cobre	alumínio
deformação uniforme ϵ_{ur}	deformação uniforme ϵ_{ur}
0,308	0,124

Tabela 4 – Valores de deformação uniforme determinados nos testes de tração dos metais trefilados (deformação residual uniforme).

condição de trefilação	deformação residual uniforme ϵ_{ur} - cobre	deformação residual uniforme ϵ_{ur} - alumínio
1 ($\alpha = 20^\circ$, $r = 3\%$)	0,296	0,086
2 ($\alpha = 20^\circ$, $r = 8\%$)	0,211	0,055
3 ($\alpha = 20^\circ$, $r = 15\%$)	0,083	0,023
4 ($\alpha = 8^\circ$, $r = 3\%$)	0,299	0,075
5 ($\alpha = 8^\circ$, $r = 8\%$)	0,238	0,049
6 ($\alpha = 8^\circ$, $r = 15\%$)	0,161	0,030
7 ($\alpha = 3^\circ$, $r = 3\%$)	0,300	0,071
8 ($\alpha = 3^\circ$, $r = 8\%$)	0,243	0,032
9 ($\alpha = 3^\circ$, $r = 15\%$)	0,153	0,030

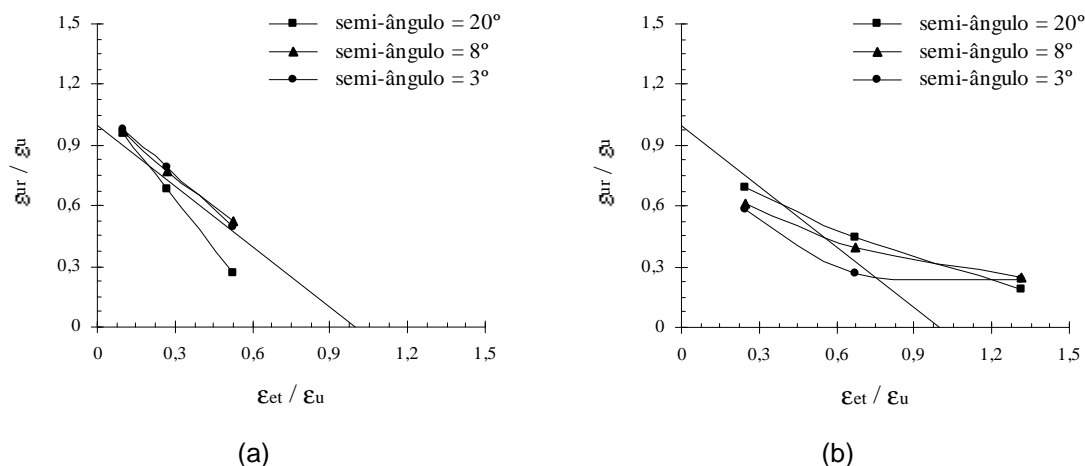


Figura 2 - Previsão da deformação residual uniforme das barras trefiladas: (a) cobre e (b) alumínio.

Observa-se que, para todas as situações e ambos os materiais, os dados não coincidem com aqueles previstos teoricamente. Para a cobre, o modelo levou a valores inferiores àqueles reais, com exceção das condições nas quais o semi-ângulo era de 20° e as reduções de área eram 8% e 15%. Para o alumínio, as diferenças verificadas também dependeram dos parâmetros da operação sendo, no entanto, mais acentuadas do que aquelas apresentadas pelo outro metal. A princípio, o comportamento exibido tanto pelo cobre como pelo alumínio poderia ser associado à já comentada ocorrência de heterogeneidade de deformação na trefilação, cujo valor médio acaba sendo superior à deformação externa ou logarítmica no processo. Seguindo esta linha de raciocínio, os pontos de ϵ_{ur} deveriam ficar abaixo dos valores estimados, evidenciando a diminuição da deformação residual uniforme com o processo, se comparada à amostra apenas tracionada. No entanto, como pode ser observado, para algumas condições, os dados se situam acima da reta, contrariando o esperado e sugerindo outro fator a influenciar os resultados, a ser comentado posteriormente, podendo inclusive reverter os efeitos da deformação não homogênea.

Nas Figuras 3 e 4 são novamente mostrados os resultados de deformação residual uniforme das barras trefiladas para os dois metais, porém associados à deformação média no processo de trefilação, ou seja, a pré-deformação considerada neste caso não é mais a deformação externa na operação e sim um valor médio obtido através da técnica experimental de visioelasticidade, desenvolvida em um

trabalho anterior.⁽¹¹⁾ O procedimento é realizado com o objetivo de “corrigir” os efeitos da heterogeneidade de deformação na operação de trefilação.

De maneira geral, observa-se que o ajuste da pré-deformação no modelo não parece levar a resultados correspondentes ao comportamento mecânico à tração pura, evidenciando novamente as limitações do uso de dados provenientes de um processamento apenas monotônico (neste caso tração nas peças recozidas) na previsão das propriedades do metal trefilado. Os resultados experimentais apresentados pelas amostras de cobre trefiladas (Figura 3) se situam acima dos dados esperados na tração pura em dois estágios e a diferença observada parece tornar-se menos acentuada à medida que o valor do semi-ângulo diminui. Já o comportamento do alumínio varia de acordo com os parâmetros da operação, sendo caracterizado na maioria das vezes, entretanto, por valores superiores àqueles teóricos (figura 4). Ressalta-se que a ocorrência de dados experimentais de ϵ_{ur} superiores aos teóricos pode ser apontada como uma elevação na ductilidade do metal, ou seja, ao empregar uma pré-deformação na trefilação, a capacidade de deformação plástica na tração subsequente fica maior que a que seria observada se a pré-deformação fosse também por tração e vice-versa.

Os resultados apresentados nas Figuras 3 e 4 podem ser associados a modificações internas observadas nos metais durante a alteração da trajetória de deformação de trefilação, processo no qual estão presentes tanto componentes de deformação cisalhantes como trativas, para tração. Diversos trabalhos conduzidos anteriormente mostraram a importância deste tipo de estudo, abordando os efeitos de mudanças no caminho de deformação no encruamento dos materiais, fenômeno investigado especialmente em operações associadas ao processamento de chapas e ensaios mecânicos usuais.⁽¹²⁻¹⁶⁾ Os experimentos revelaram que, dentre outros resultados, as tensões iniciais durante o recarregamento são um dos fatores mais afetados após uma alteração na trajetória de deformação. Neste sentido, poderiam ser observados dois tipos de comportamentos 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 até mesmo negativa. Em relação à ductilidade, neste caso deformação residual uniforme, a elevação das tensões de recarregamento ocorreria em conjunto com uma deformação residual inferior àquela prevista teoricamente, ou seja, seria caracterizada uma redução na ductilidade, enquanto nas situações nas quais fossem observados valores de tensão iniciais inferiores, ϵ_{ur} seria superior.⁽¹⁰⁾

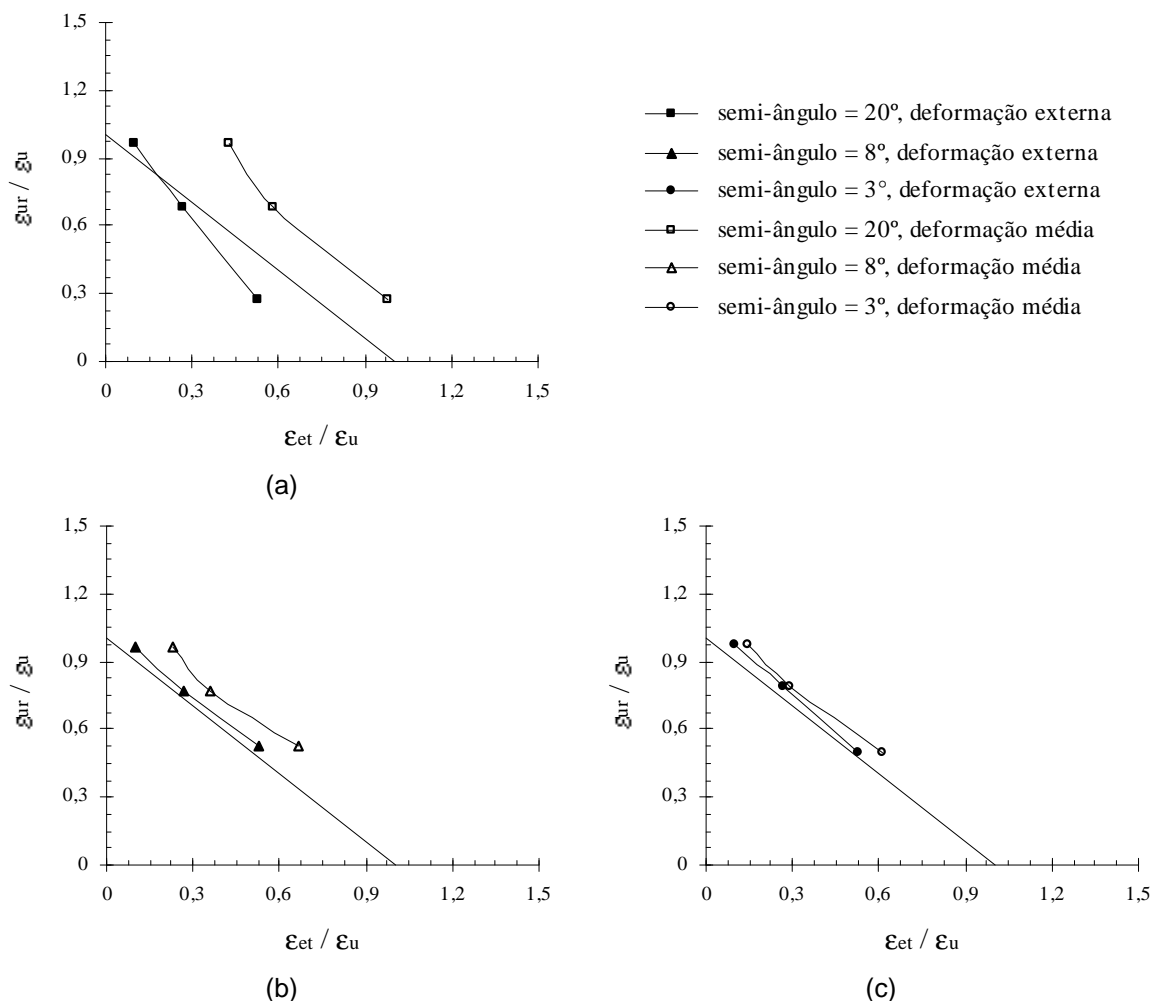


Figura 3 - Previsão da deformação residual uniforme das barras de cobre trefiladas - correção deformação média: (a) $\alpha = 20^\circ$, (b) $\alpha = 8^\circ$ e (c) $\alpha = 3^\circ$.

Considerando novamente os resultados mostrados nas Figuras 3 e 4, para verificar a correspondência mencionada anteriormente entre a resistência mecânica e a ductilidade de metais submetidos a alterações na trajetória de deformação, curvas tensão efetiva – deformação efetiva (porções iniciais das mesmas) do cobre e do alumínio trefilados com $\alpha = 20^\circ$ e 3° e $r = 8\%$ superpostas nos dados dos materiais recozidos, apresentadas e discutidas em um trabalho anterior,⁽¹⁷⁾ são exibidas nas Figuras 5 e 6. Ressalta-se que os valores de pré-deformação nos referidos gráficos são os mesmos empregados como deformação média nas Figuras 3 e 4. Para o cobre (Figura 5), verifica-se que nas duas condições de operação, caracterizadas por uma “elevação” na ductilidade, as tensões iniciais no recarregamento à tração são inferiores àquelas obtidas para a tração pura, conforme os dados da literatura⁽¹⁰⁾. Além disso, para ambas as abordagens, as diferenças são mais suaves com a diminuição no valor do semi-ângulo. Para o alumínio (Figura 6), correspondência é verificada para a situação na qual $\alpha = 3^\circ$, com tensões iniciais na tração subsequente superiores e valores de deformação residual uniforme inferiores. Já para $\alpha = 20^\circ$, apesar da ductilidade superior, os valores de tensão de recarregamento também são elevados.

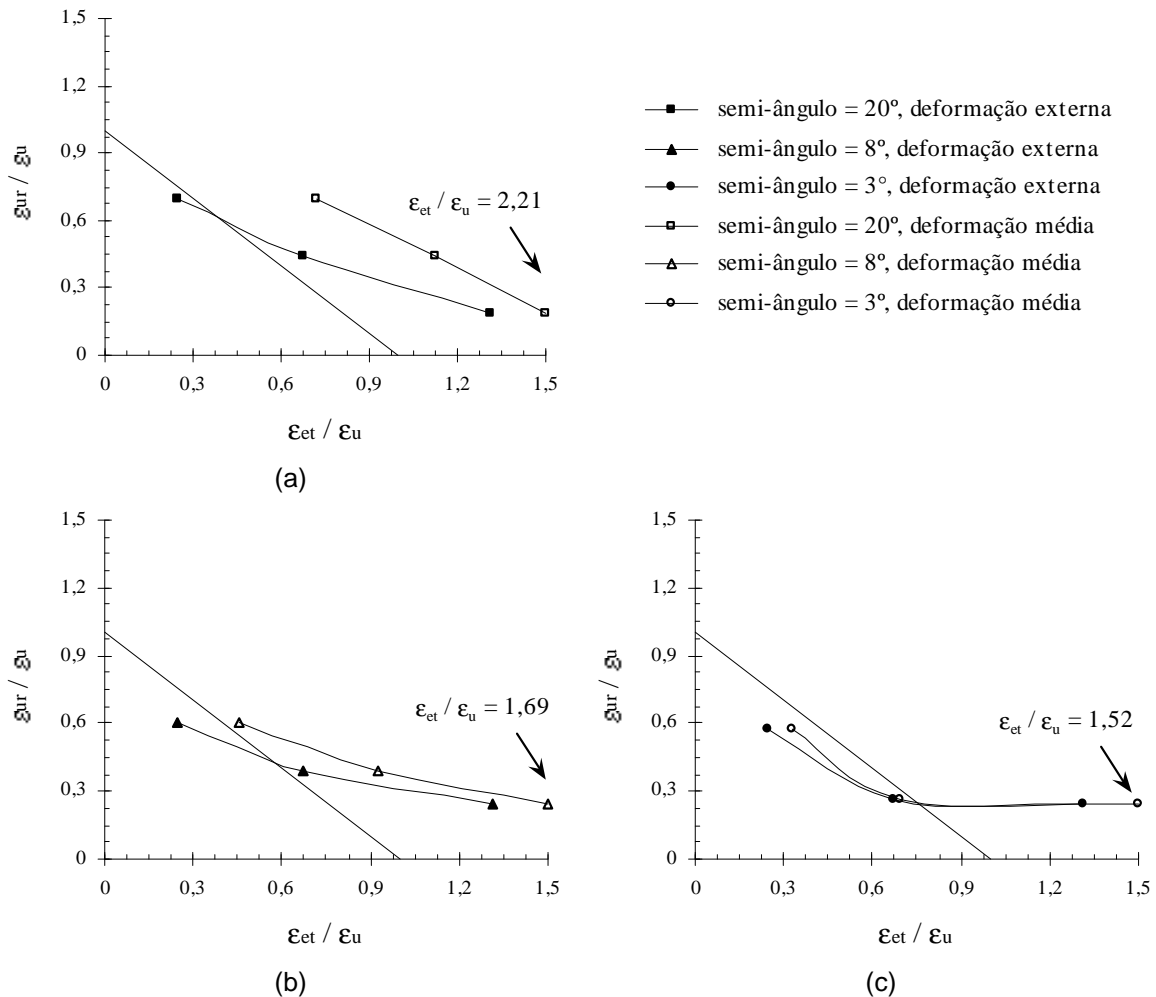


Figura 4 - Previsão da deformação residual uniforme das barras de alumínio trefiladas - correção deformação média: (a) $\alpha = 20^\circ$, (b) $\alpha = 8^\circ$ e (c) $\alpha = 3^\circ$.

4 CONCLUSÕES

- O modelo teórico apresentado para a determinação da deformação residual uniforme das barras de cobre e alumínio, considerando como pré-deformação a deformação média na trefilação, levou à obtenção de dados, em geral, inferiores àqueles observados experimentalmente, com exceção de algumas situações para o alumínio.
- Efeitos de caminho de deformação foram indicados pela análise conjunta dos resultados relativos à ductilidade e as curvas tensão efetiva – deformação efetiva dos metais.

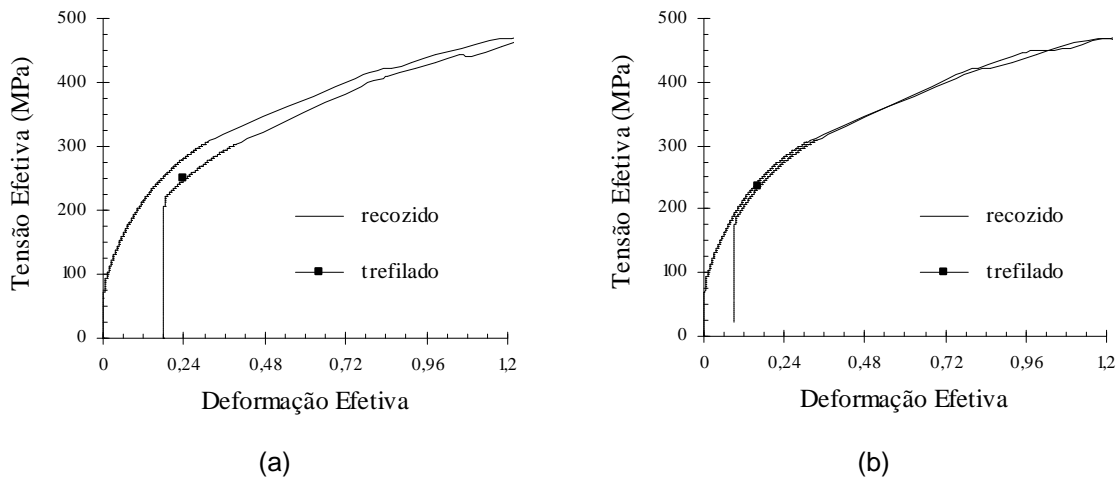


Figura 5 – Efeito da mudança na trajetória de deformação de trefilação para tração no comportamento mecânico de barras de cobre – condições de trefilação: (a) $\alpha = 20^\circ$ e $r = 8\%$ e (b) $\alpha = 3$ e $r = 8\%$.

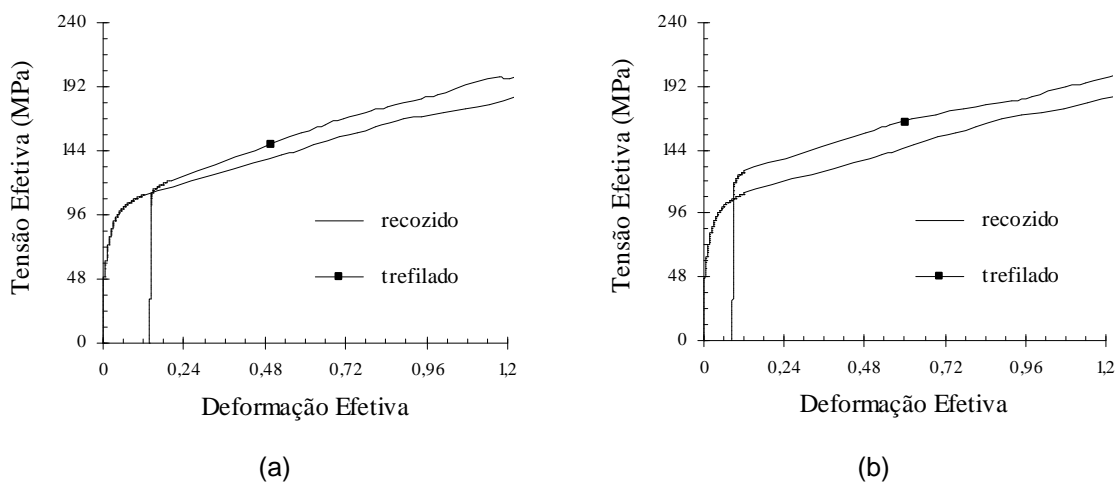


Figura 6 – Efeito da mudança na trajetória de deformação de trefilação para tração no comportamento mecânico de barras de alumínio – condições de trefilação: (a) $\alpha = 20^\circ$ e $r = 8\%$ e (b) $\alpha = 3$ e $r = 8\%$.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- 1 CADDELL, R.M., ATKINS, A.G. The Influence of Redundant Work When Drawing Rods Through Conical Dies. *Journal of Engineering Industry*, p. 411-419, May 1968.
- 2 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.
- 3 SADOK, L., LUKSZA, J., MAJTA, J. Inhomogeneity of Mechanical Properties In Stainless Steel Rods After Drawing. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 44, p. 129-141, 1994.
- 4 KAZEMINEZHAD, M. A. Study on the Computation of the Redundant Deformation Factor in wire Drawing of Austenitic 304 Stainless Steel. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 199, p. 230-233, 2008.

- 5 LIN, H.S., HSU, Y.C., KEH, C.C. Inhomogeneous Deformation and Residual Stress in Skin-Pass Axisymmetric Drawing. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 201, p. 128-132, 2008.
- 6 SADOK, L., LUKSZA, J., MAJTA, J., SKOLYSZEWSKI, A. Analysis of Inhomogeneity of Mechanical Properties In Stainless Steel Rods After Drawing. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 45, p. 293-298, 1994.
- 7 JOHNSON, R.W., ROWE, G.W. Redundant Work in Drawing Cylindrical Stock. *Journal of the Institute of Metals*, v. 96, p. 97-105, 1968
- 8 MAJTA J., LUKSZA J., SADOK L. The Estimation of Mechanical Properties Distribution in Plastic Working Products: Example for the Drawing Process. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 34, p. 389-396, 1992.
- 9 GIFFORD, R.B., BANDAR, A.R., MISIOLEK, W.Z., COULTER, J.P. A Numerical Investigation of Wire Drawing Process. In: *8th International Conference on Metal Forming - Metal Forming 2000*, Kraków, 3-7 September 2000, *Proceedings...* p. 597-604.
- 10 LLOYD, D.J., SANG, H. The Influence of Strain Path on Subsequent Mechanical properties - Orthogonal Tensile Paths. *Metallurgical Transactions*, v. 10A, p. 1767-1772, November 1979.
- 11 CORRÊA, E.C.S., SANTOS, C.A., AGUILAR, M.T.P., CETLIN, P.R. Avaliação Experimental da Deformação em Barras de Cobre e Alumínio Trefiladas. In: *XVII Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais - CBECIMAT*, 2006, Foz do Iguaçu. *Anais...* p. 7194-7205.
- 12 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.
- 13 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.
- 14 FERNANDES, J.V., VIEIRA, M.F. Strain Distribution in Copper Tensile Specimens Prestrained in Rolling. *Metallurgical and Materials Transactions*, v. 28A, p. 1169-1778, May 1997.
- 15 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.
- 16 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.
- 17 CORRÊA, E.C.S., AGUILAR, M.T.P., CETLIN, P.R. Análise do Comportamento Mecânico de barras de Cobre e Alumínio Trefiladas em Um Passe. In: *V Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação - COBEF*, 2009, Belo Horizonte. *Anais...* p. 1-8.