

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE BARRAS DE COBRE E ALUMÍNIO TREFILADAS EM UM PASSE

Elaine Carballo Siqueira Corrêa, elaine@deii.cefetmg.br¹

Maria Teresa Paulino Aguilar, teresa@demc.ufmg.br²

Paulo Roberto Cetlin, pctlin@demet.ufmg.br²

¹Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG, Avenida Amazonas 5253 Nova Suíça – Belo Horizonte/Minas Gerais - 30480-000.

²Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Rua Espírito Santo 35 Centro – Belo Horizonte/Minas Gerais - 30160-030.

Resumo: O comportamento mecânico dos metais é influenciado por diversos fatores, que vão desde suas características estruturais até os parâmetros de uma operação a qual o mesmo tenha sido eventualmente submetido. Considerando especificamente a trefilação de barras, um dos aspectos mais relevantes de análise é a ocorrência de heterogeneidade de deformação ao longo da seção transversal do metal, resultado de um processo de cisalhamento interno decrescente da superfície para o centro da peça, que teria como consequência final a distribuição igualmente não uniforme de propriedades mecânicas. Dentro deste contexto, no presente trabalho o comportamento mecânico de barras de cobre e de alumínio previamente trefiladas em um passe foi avaliado. Duas condições de operação foram empregadas no estudo, associadas ao uso de dois semi-ângulos de fieira e uma redução de área. A análise foi conduzida através das curvas de escoamento à tração dos metais, considerados compostos por camadas ou volumes concêntricos. Os resultados evidenciaram as diferenças em termos de encruamento tanto ao longo da seção transversal das barras trefiladas como em relação às condições de processamento utilizadas e às características estruturais do material avaliado. Por fim, a possibilidade de previsão de comportamento mecânico a partir dos parâmetros da operação de trefilação e da curva de escoamento dos mesmos apenas recozidos foi analisada.

Palavras-chave: trefilação, comportamento mecânico, encruamento, tração

1. INTRODUÇÃO

A previsão do comportamento mecânico final de metais previamente deformados a frio representa uma importante área de estudo na indústria metalúrgica, visto que possibilita melhor controle do processo e das propriedades finais do produto. Essa análise envolve a avaliação de diversos fatores, como os aspectos estruturais do material, as variáveis da operação e a própria deformação e/ou tratamentos térmicos aos quais o mesmo tenha sido anteriormente submetido.

Para o caso da trefilação de barras, alguns trabalhos foram conduzidos com o objetivo de estimar a resistência mecânica e a ductilidade do metal (Johnson & Rowe, 1968; Caddell & Atkins, 1968). Uma previsão do comportamento mecânico adequada, entretanto, deve considerar em detalhes as características da deformação no processo, geralmente heterogênea ao longo da seção transversal da peça, em maior ou menor magnitude de acordo com os parâmetros da operação (Caddell & Atkins, 1968; Cetlin, 1984; Johnson & Rowe, 1968; Cetlin, 1987; Sadok & Packo, 1989; Kazeminezhad, 2008; Majzoubi et al, 2008 e Lin et al, 2008). Em adição à ocorrência dessa deformação não homogênea, que por si só já representa uma situação complexa na avaliação do encruamento posterior do material, a presença dos esforços cisalhantes na operação, decrescentes da superfície para o centro da peça, implica também na ocorrência de diferentes trajetórias de deformação ao longo da seção transversal da peça durante a trefilação. Neste caso, nota-se que as regiões próximas à superfície e ao centro da amostra estão sujeitas a deformações com características distintas, diferença que se torna mais pronunciada durante um possível processamento mecânico subsequente (como em passes de conformação posteriores ou, até mesmo, na análise do comportamento mecânico ulterior do metal, por exemplo, à tração), ocasiões nas quais seriam caracterizadas alterações no caminho de deformação diversas de acordo com a região do metal trefilado. No entanto, apesar da importância, os efeitos de mudanças no caminho de deformação, que geralmente se manifestam em termos de tensões de recarregamento alteradas e transientes no encruamento (Viatkina et al., 2007), têm sido observados mais comumente em investigações conduzidas empregando ensaios mecânicos e/ou processamento de chapas (Lloyd & Sang, 1979; Wilson et al., 1990; Rauch et al., 2002; Kusnierz et al., 2003; van Riel & van den Boogaard, 2007), sem menção à trefilação de barras.

Dentro deste contexto, neste trabalho é avaliado o comportamento mecânico à tração subsequente de amostras de cobre e alumínio trefiladas considerando-as compostas por quatro volumes concêntricos: camada central (até 30% do raio da barra trefilada), camada intermediária 1 (de 30% a 55% do raio da barra trefilada), camada intermediária 2 (de 55% a 85% do raio da barra trefilada) e camada superficial (de 85% a 100% do raio da barra trefilada).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

Foram empregadas neste trabalho barras de cobre e alumínio, cujas composições químicas (% em peso) são mostradas na Tab. (1).

Tabela 1. Composição química dos materiais utilizados nos experimentos (% em peso).

Cobre (% em peso)		Alumínio (% em peso)	
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

2.2. Corpos de Prova

Foram confeccionados por usinagem três tipos de corpos de prova. O primeiro, empregado apenas para a obtenção da curva tensão-deformação dos metais recozidos em testes de tração, consistiu em amostras de seção transversal circular com diâmetro e comprimento úteis de 10mm e 60mm, respectivamente. O segundo grupo, a ser inicialmente trefilado e depois tracionado, utilizado para análise do comportamento mecânico das camadas central e intermediárias do metal trefilado, apresentou seção transversal constante e comprimento útil de aproximadamente 200,00mm, além de uma região de contato com a garra de trefilação de cerca de 90mm de comprimento e 9,50mm de diâmetro (apontamento). Neste caso, o diâmetro útil de 10,43mm foi determinado de forma que, após a operação de conformação realizada com a redução de área desejada, o diâmetro final seria de 10,00mm. O terceiro tipo de peças, também a ser trefilado e tracionado, empregado para o estudo do comportamento das barras trefiladas inteiras e das amostras referentes à camada superficial das mesmas, apresentou uma geometria especial, com regiões nas extremidades (além do apontamento) com área de seção transversal superior àquela da parte útil do corpo de prova. Essa geometria foi utilizada com o objetivo de evitar a possível ruptura da barra conformada dentro das garras durante o ensaio mecânico subsequente, uma vez que as extremidades estariam mais encruadas que o resto da amostra. O mesmo o diâmetro útil calculado para o segundo grupo de amostras foi considerado. Após a confecção, todos os corpos de prova foram recozidos a 570°C durante 5400s (cobre) e a 400°C durante 3600s (alumínio). Por fim, as peças a serem trefiladas foram jateadas com microesferas de vidro para facilitar a lubrificação durante o processo de conformação.

2.3. Trefilação

Os corpos de prova foram trefilados em uma máquina universal de ensaios Instron modelo 5582 com sistema de controle e aquisição de dados Merlin, especialmente adaptada para o processo. Foram empregadas 2 condições de operação, decorrentes da utilização de dois semi-ângulos de fieira α , 3° e 20°, e uma redução de área r de 8%. O processo foi conduzido em um único passe, a uma velocidade de 10mm/min, levando a taxas de deformação de $2,35 \times 10^{-2} s^{-1}$ e $3,39 \times 10^{-3} s^{-1}$, determinadas de acordo com os valores de α e r . O lubrificante utilizado em todos os experimentos foi bissulfeto de molibdênio.

2.4. Preparação dos Corpos de Prova Referentes à Camadas dos Materiais Trefilados

A partir das peças trefiladas, corpos de prova referentes às camadas central (amostra maciça com 3mm de diâmetro útil), intermediária 1 (amostra tubular de região útil com diâmetros interno e externo de 3,00mm e 5,50mm, respectivamente), intermediária 2 (amostra tubular de região útil com diâmetros interno e externo de 5,50mm e 8,50mm, respectivamente) e superficial (amostra tubular com diâmetros interno e externo de 8,50mm e 10,00mm) foram confeccionadas através de usinagem. Todas as peças foram preparadas de maneira que no ensaio de tração o comprimento útil inicial seria de 40,00mm.

2.5. Ensaio de Tração

Os ensaios de tração também foram realizados na máquina de ensaios Instron modelo 5582 com sistema de controle e aquisição de dados Merlin, empregando um extensômetro eletrônico modelo 2630-100. Os testes foram conduzidos a

uma velocidade de 4mm/min, levando a taxas de deformação iniciais de $1,1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ (corpos de prova recozidos) e $1,7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ (corpos de prova trefilados). Para as amostras nas quais a seção transversal da região útil era maciça, ou seja, as peças recozidas, trefiladas inteiras e trefiladas – camada central, o procedimento usado nos testes foi o usual: obtenção de dados de carga e deformação diretamente do equipamento e acessórios até o início da estricção, seguida de medidas periódicas de carga, diâmetro e raio da mesma até a ruptura, possibilitando a montagem das curvas de escoamento à tração completas, incluindo a utilização de correção de Bridgman (Dieter, 1988). Para os corpos de prova tubulares, ou seja, amostras relativas às camadas superficial e intermediárias dos metais trefilados, um método alternativo foi adotado, visto que a determinação das dimensões da peça (diâmetro interno ou espessura) durante a estricção seria mais difícil. Neste caso, até a carga máxima, a aquisição dos dados era similar àquela descrita anteriormente. A partir deste momento, um número maior de corpos de prova era empregado, de forma que os ensaios eram conduzidos até valores distintos de deformação, associados a diferentes diâmetros de estricção, e então interrompidos para a medição das peças, resultando na perda subsequente das mesmas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As curvas de escoamento à tração relativas às barras de cobre e alumínio trefiladas (amostras inteiras e camadas das mesmas) são exibidas nas Figs. (1) a (4). Observa-se que para cada condição de operação são apresentados dois gráficos, o primeiro associado apenas à deformação plástica uniforme dos corpos de prova e o segundo com as curvas completas, procedimento adotado para facilitar a análise da região inicial das mesmas. Nota-se também que para as situações nas quais o $\alpha = 3^\circ$, são mostrados resultados referentes apenas às peças inteiras e às camadas central e superficial, não sendo julgado necessário apresentar as demais curvas para a análise.

Considerando inicialmente os resultados obtidos para o cobre (Figs. (1) e (2)), verifica-se que para $\alpha = 20^\circ$, as curvas tensão-deformação das quatro camadas da barra trefilada são distintas, aparecendo em ordem crescente de resistência mecânica do centro para a superfície da peça, fenômeno que parece tornar-se menos acentuado à medida que a deformação é conduzida. A curva associada à barra inteira, por sua vez, situa-se entre as demais, como uma média do comportamento mecânico do metal. Para $\alpha = 3^\circ$, ainda que de maneira um pouco mais suave, resultados similares são observados. O alumínio trefilado (Figs. (3) e (4)) também exibe curvas de escoamento distintas ao longo da seção transversal, com a diferença entre os dados referentes à superfície e ao centro menos acentuada para o semi-ângulo de 3° . No entanto, em contraste com o cobre, à medida que a tração é realizada, os valores se tornam mais distantes.

A ocorrência de um perfil não uniforme de propriedades mecânicas em amostras metálicas trefiladas é um fenômeno relativamente esperado, observado em outros materiais e ensaios, especialmente dureza (Caddell & Atkins, 1968; Cetlin, 1984; Majta et al, 1992; Sadok et al, 1994 e Sadok et al, 1994). Como mencionado anteriormente, a heterogeneidade de propriedades do material se dá em virtude da distribuição igualmente não homogênea de deformação efetiva ao longo da seção transversal das peças, consequência do processo de cisalhamento interno decrescente da superfície para o centro das mesmas pelo qual o metal passa (Johnson & Rowe, 1968; Cetlin, 1987; Sadok & Packo, 1989; Kazeminezhad, 2008; Majzoobi et al, 2008 e Lin et al, 2008). Os parâmetros geométricos da operação, semi-ângulo de fiação e redução de área, são geralmente apontados como os fatores mais importantes neste caso, especialmente o primeiro, para o qual é observada a seguinte relação: à medida que o valor de α aumenta, mais heterogênea é a distribuição da mesma. Considerando os materiais empregados na presente análise, uma avaliação da deformação no processo de trefilação e do efeito do semi-ângulo e da redução de área foi conduzida previamente para condições semelhantes (e outras) às exibidas neste estudo através da técnica experimental de visioelasticidade (Corrêa et al, 2006). Na Fig. (5) podem ser visualizados perfis de deformação efetiva para as barras metálicas obtidos através do referido método. Nota-se claramente uma distribuição mais heterogênea para $\alpha = 20^\circ$ e quase uniforme para $\alpha = 3^\circ$.

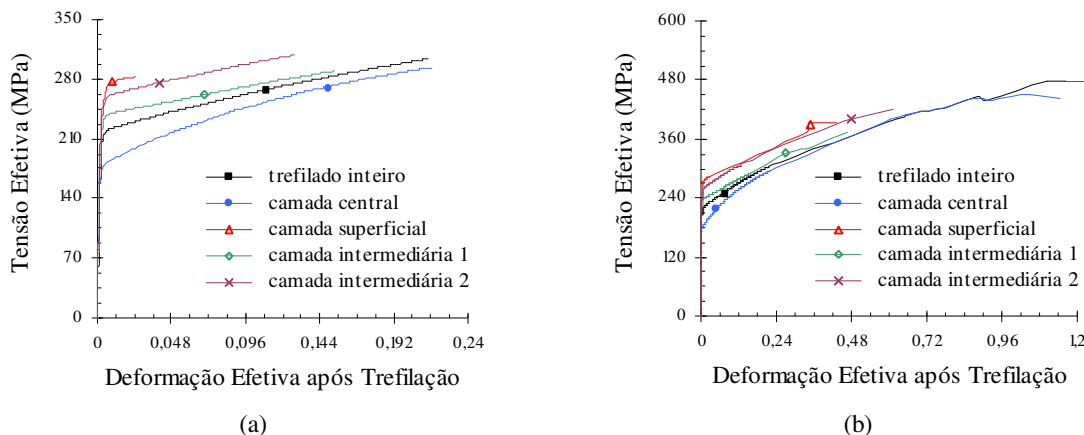


Figura 1. Curvas de escoamento à tração do cobre trefilado com $\alpha = 20^\circ$ e $r = 8\%$ - barra inteira e camadas: (a) região das curvas relativa apenas à deformação plástica uniforme e (b) curvas completas.

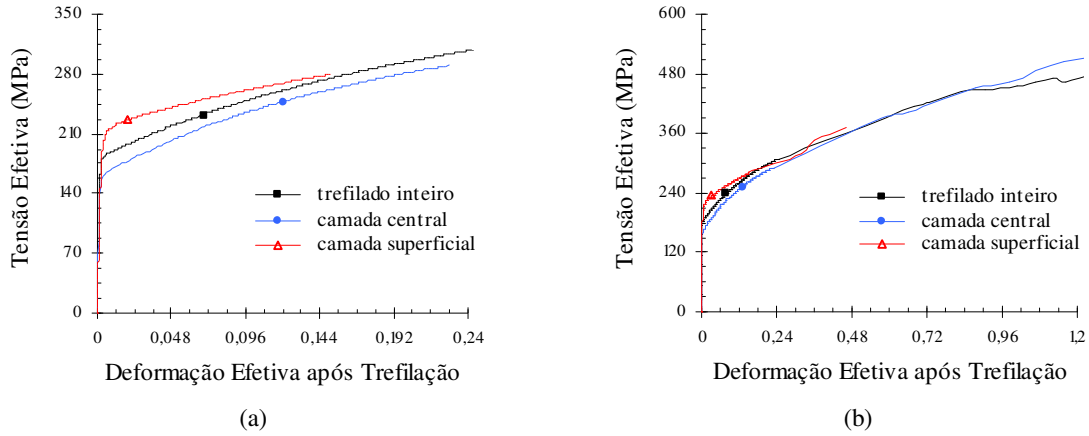


Figura 2. Curvas de escoamento à tração do cobre trefilado com $\alpha = 3^\circ$ e $r = 8\%$ - barra inteira e camadas: (a) região das curvas relativa apenas à deformação plástica uniforme e (b) curvas completas.

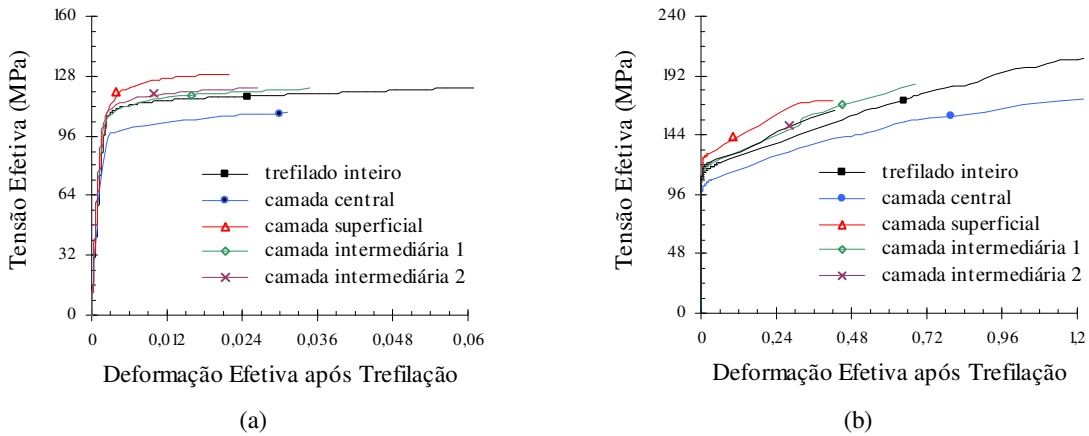


Figura 3. Curvas de escoamento à tração do alumínio trefilado com $\alpha = 20^\circ$ e $r = 8\%$ - barra inteira e camadas: (a) região das curvas relativa apenas à deformação plástica uniforme e (b) curvas completas.

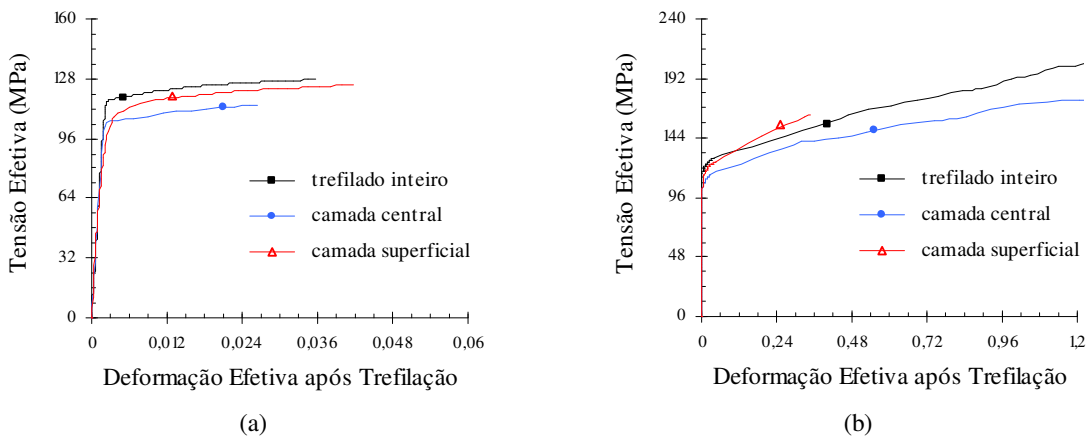


Figura 4. Curvas de escoamento à tração do alumínio trefilado com $\alpha = 3^\circ$ e $r = 8\%$ - barra inteira e camadas: (a) região das curvas relativa apenas à deformação plástica uniforme e (b) curvas completas.

Ao comparar os resultados apresentados nas Figs. (1) a (4) com as curvas da Fig. (5), entretanto, observa-se uma certa discrepância entre o comportamento mecânico dos metais e a deformação associada ao processo. Enquanto os perfis de deformação exibem formatos claramente distintos de acordo com o valor do semi-ângulo de feira empregado,

as curvas de escoamento das camadas ou "distribuição das mesmas" para $\alpha = 3^\circ$, ainda que menos separadas umas das outras do que na condição onde $\alpha = 20^\circ$, parecem ser mais próximas de perfis de deformação não homogêneos, oposto do que é previsto na literatura e foi efetivamente determinado para esta condição. Esses resultados indicam, portanto, que ao avaliar ou prever o comportamento mecânico subsequente das barras previamente trefiladas, as características da deformação conduzida, de maneira qualitativa ou quantitativa, não devem ser os únicos fatores a serem considerados.

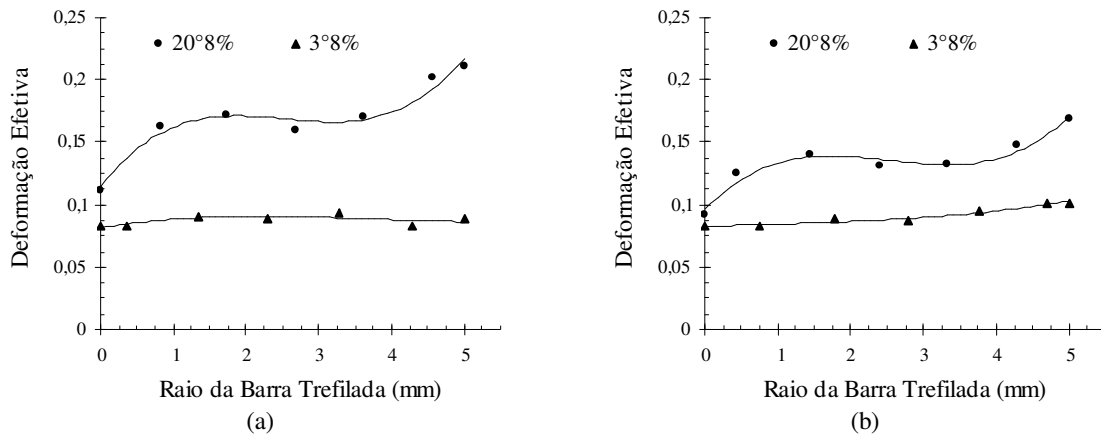


Figura 5. Distribuições de deformação efetiva ao longo da seção transversal das barras trefiladas obtidas através da técnica experimental de visioplasticidade: (a) cobre e (b) alumínio (Corrêa et al, 2006).

Com o objetivo de analisar a possibilidade de previsão do comportamento mecânico dos metais previamente trefilados a partir das características dos mesmos recozidos e das condições de operação, nas Figuras (6) a (9) são apresentadas as curvas tensão-deformação das barras trefiladas, corpos de prova inteiros e camadas central e superficial (não foi considerado necessário utilizar as demais, porque os dados empregados já representariam extremos), superpostas nos resultados de ensaio de tração obtidos para os metais recozidos. Nota-se que as curvas das amostras trefiladas estão deslocadas de um determinado valor de deformação, que representa a deformação média conduzida no processo de conformação prévio. Esses valores foram calculados a partir das distribuições de deformação exibidas na Fig. (5), como uma média das mesmas, considerando os perfis inteiros para representar a deformação na trefilação das amostras tracionadas inteiras, considerando os perfis até um raio de 1,5mm para representar a pré-deformação na camada central das peças e considerando os perfis com raios de 4,25 a 5mm para representar a pré-deformação na camada superficial das amostras trefiladas. A princípio, a utilização destes dados, em conjunto com os resultados referentes ao metal apenas tracionado, poderia levar a uma razoável análise ou previsão do comportamento mecânico subsequente do material trefilado. No entanto, como pode ser observado nas Figs. (6) a (9) a simples consideração de que o comportamento de um material pré-processado seria equivalente ao comportamento do mesmo recozido a partir do valor de deformação prévia não parece ser suficiente.

Avaliando inicialmente o cobre (Figs. (6) e (7)), verifica-se que, para ambas as condições de trefilação, a curva de escoamento à tração da barra trefilada inteira apresenta valores de tensão inferiores àqueles que seriam esperados na previsão de seu comportamento mecânico empregando a curva do recozido. Esses resultados são similares aos observados para as camadas centrais, cujas curvas de escoamento também se situam abaixo da monotônica e opostos aos dados relativos aos volumes superficiais, que são superiores. Em todas as situações, as curvas parecem tender, a medida que a deformação é conduzida, para os dados do recozido, ou seja, para a curva relativa ao último tipo de esforço aplicado. Para o alumínio (Figs. (8) e (9)), tanto as amostras trefiladas inteiras como as camadas superficiais apresentam tensões efetivas superiores àquelas mostradas pelo material recozido apenas tracionado em níveis de deformação similares. Já as curvas do centro exibem comportamentos distintos de acordo com o valor de α . Resultados similares a esses vêm sendo observados e analisados em trabalhos abordando os efeitos de mudanças no caminho de deformação no encruamento subsequente de metais, nos quais tem sido mostrado que, mesmo considerando os valores de deformação prévia na análise do encruamento posterior dos mesmos, as tensões de recarregamento, ou tensões iniciais de fluxo, podem estar acima ou abaixo daquelas que seriam esperadas, de acordo com a magnitude da mudança no caminho de deformação, com as características dos arranjos micro e subestruturais gerados na deformação prévia e com os aspectos estruturais do material, entre outros (Kusnierz et al, 2003; Lloyd & Sang, 1979; Wilson et al, 1990; Rauch et al., 2002; Van Riel & Van den Boogaard, 2007; Viatkina et al., 2007). Dessa forma fica evidenciado que para uma análise e mesmo previsão do comportamento mecânico ulterior das barras trefiladas, devem ser associados os efeitos do gradiente de deformação na peça, das características de encruamento do próprio metal e de mudanças no caminho ou trajetória de deformação.

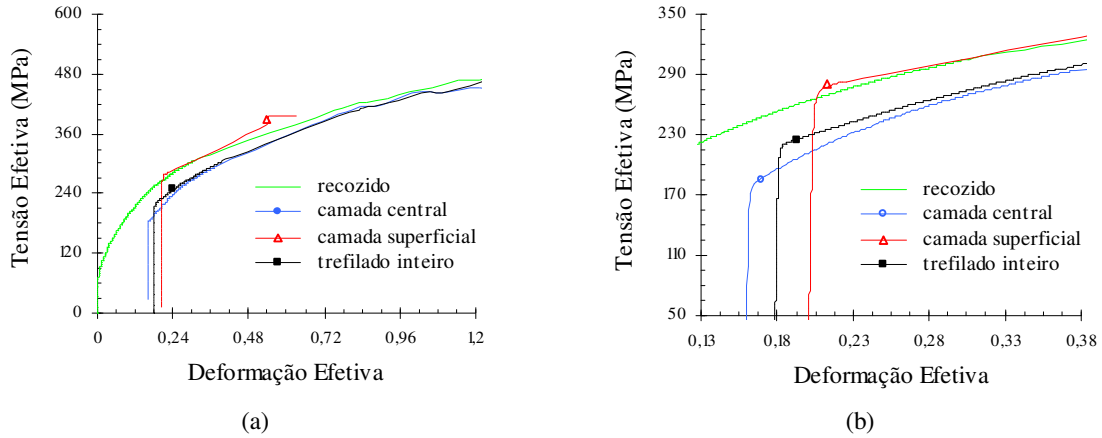


Figura 6. Curvas tensão efetiva (MPa)-deformação efetiva da barra de cobre trefilada com $\alpha = 20^\circ$ e $r = 8\%$ superpostas nos resultados do metal recozido: (a) curva completa e (b) detalhe.

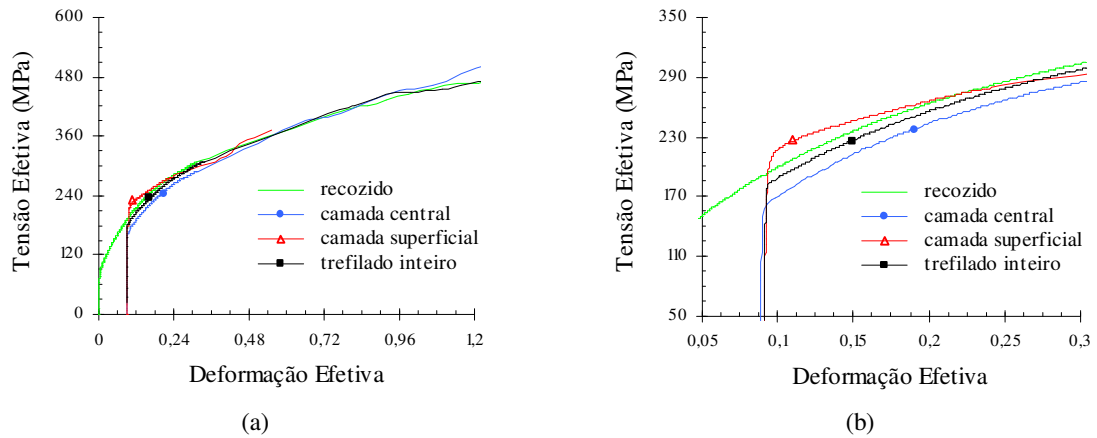


Figura 7. Curvas tensão efetiva (MPa)-deformação efetiva da barra de cobre trefilada com $\alpha = 3^\circ$ e $r = 8\%$ superpostas nos resultados do metal recozido: (a) curva completa e (b) detalhe.

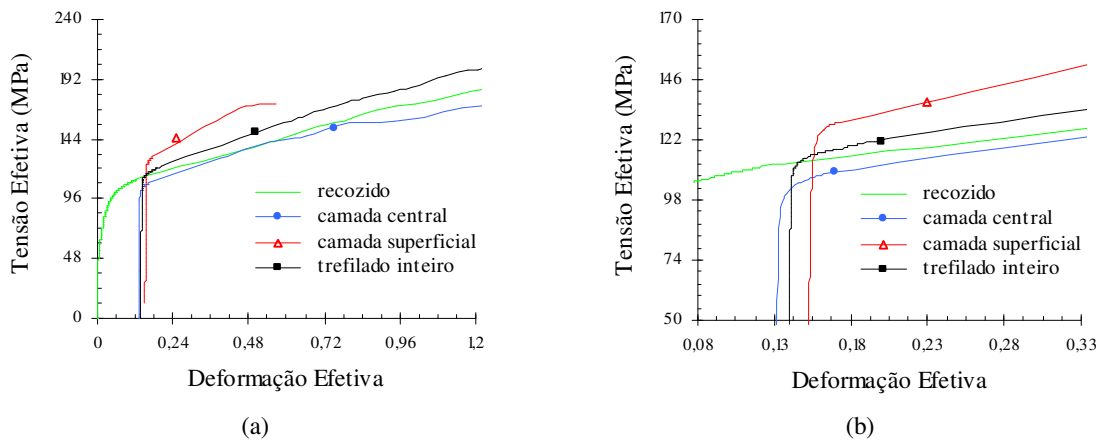


Figura 8. Curvas tensão efetiva (MPa)-deformação efetiva da barra de alumínio trefilada com $\alpha = 20^\circ$ e $r = 8\%$ superpostas nos resultados do metal recozido: (a) curva completa e (b) detalhe.

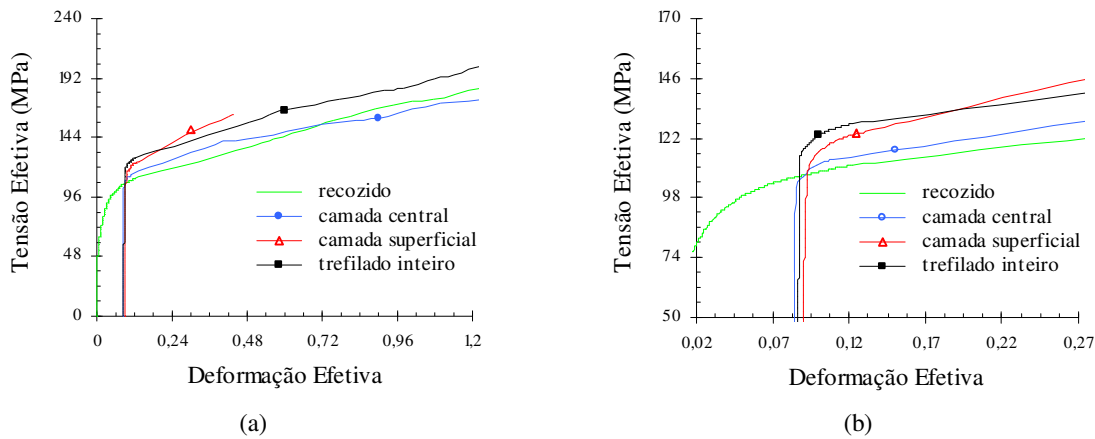


Figura 9. Curvas tensão efetiva (MPa)-deformação efetiva da barra de alumínio trefilada com $\alpha = 3^\circ$ e $r = 8\%$ superpostas nos resultados do metal recozido: (a) curva completa e (b) detalhe.

4. CONCLUSÕES

- O comportamento mecânico de barras de cobre e alumínio trefiladas em um passe, consideradas compostas por camadas, foi analisado através da determinação direta das curvas de escoamento à tração das mesmas.
- Tanto para o cobre como para o alumínio, comportamento mecânico heterogêneo foi observado ao longo da seção transversal das amostras trefiladas, cuja magnitude dependeu do semi-ângulo de feira empregado no processo. Neste caso, a influência do valor do semi-ângulo foi mais acentuada para o cobre, onde foi verificado que a diferença entre as curvas referentes às camadas superficial e central era mais pronunciada para o semi-ângulo de 20° do que para 3° . Já para o alumínio, a influência do semi-ângulo não foi tão evidente.
- A análise da possibilidade de previsão direta do comportamento mecânico subsequente do material trefilado a partir da curva de escoamento do metal recozido e do valor da deformação na trefilação evidenciou que, além do perfil de deformação heterogêneo na operação de conformação, os efeitos de mudanças na trajetória de deformação devem ser considerados no estudo. Para o cobre trefilado, para ambos os semi-ângulos usados no trabalho, a alteração no caminho de deformação de trefilação para tração levou ao desenvolvimento de curvas de escoamento da camada superficial acima daquela relativa apenas à tração, enquanto comportamento oposto foi observado para a camada central e a barra inteira. O alumínio, por outro lado, apresentou todas as curvas tensão-deformação das barras trefiladas acima da recozida, com exceção da camada central da peça deformada com semi-ângulo de 20° .

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro e à Belgo Mineira Bekaert Artefatos pela doação das feiras de trefilação.

6. REFERÊNCIAS

- Caddell, R.M., Atkins, A.G., "The Influence of Redundant Work When Drawing Rods Through Conical Dies", Journal of Engineering for Industry, Vol. May, pp. 411-419.
- Cetlin, P.R., 1984, "Redundant Deformation Factor Evaluation Through the Hardness Profile Method in Round Section Bar Drawing", Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 106, pp. 147-151.
- Cetlin, P.R., 1987, "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, Vol. 109, pp. 272-275.
- Corrêa, E.C.S., Santos, C.A., Aguilar, M.T.P., Cetlin, P.R., 2006, "Avaliação Experimental da Deformação em Barras de Cobre e Alumínio Trefiladas", Anais do 17º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Foz do Iguaçu, Brasil, pp. 7194-7205.
- Dieter, G.E., 1988, "Mechanical Metallurgy", 2 ed, Ed. McGraw-Hill, London, England, 751p.
- Johnson, R.W., Rowe, G.W., 1967, "Prediction the Ductility of Drawn Wire", The Wire Industry, Vol. January, pp. 61-62.
- Johnson, R.W., Rowe, G.W., 1968, "Redundant Work in Drawing Cylindrical Stock", Journal of the Institute of Metals, Vol. 96, pp. 97-105.
- Kazeminezhad, M. 2008, "A Study on the Computation of the Redundant Deformation Factor in wire Drawing of Austenitic 304 Stainless Steel", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 199, pp. 230-233.

- Kusnierz, J., Kurowski, M., Baliga, W., 2003, "Strain Softening Effects in Microstructure of Twisted Pre-Deformed Copper Rods", *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 81, pp. 548-551.
- Lin, H.S., Hsu, Y.C., Keh, C.C., 2008, "Inhomogeneous Deformation and Residual Stress in Skin-Pass Axisymmetric Drawing", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 201; pp. 128-132.
- Lloyd, D.J., Sang, H., 1979, "The Influence of Strain Path on Subsequent Mechanical Properties - Orthogonal Tensile Paths", *Metallurgical Transactions*, Vol. 10A, pp. 1767-1772.
- Majta, J., Luksza, J., Sadok, L., 1992, "The estimation of Mechanical Properties Distribution in Plastic Working Products: Example for the Drawing Process", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 34, pp. 389-396.
- Majzooobi, G.H., Fereshteh, F., Aghili, S.A., 2008, "An Investigation into the Effect of Redundant Shear Deformation in Bar Drawing", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 201, pp. 133-137.
- Rauch, E.F., Gracio, J.J., Barlat, F., Lopes, A.B., Duarte, J.F., 2002, "Hardening Behavior and Structural Evolution Upon Strain Reversal of Aluminum Alloys", *Scripta Materialia*, Vol. 46, pp. 881-886.
- Sadok, L., Luksza, J., Majta, J., 1994, "Inhomogeneity of Mechanical Properties In Stainless Steel Rods After Drawing" *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 44, pp. 129-141.
- Sadok, L., Luksza, J., Majta, J., Skolyszewski, A., 1994, "Analysis of Inhomogeneity of Mechanical Properties in Stainless Steel Rods After Drawing", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 45, pp. 293-298.
- Sadok, L., Packo, M., 1989, "Application of Numerical Techniques to the Analysis of Strains in the Drawing Process", *Steel Research*, Vol. 60, No. 8, pp. 351-355.
- Van Riel, M., Van den Boogaard, A.H., "Stress-strain responses for continuous orthogonal strain path changes with increasing sharpness", *Scripta Materialia*, Vol. 57, pp. 381-384.
- Viatkina, E.M., Brekelmans, W.A.M., Geers, M.G.D., 2007, "Modelling the evolution of dislocation structures upon stress reversal", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 44, pp. 6030-6054.
- Wilson, D.V., Zandrahimi, M., Roberts, W.T., 1990, "Effects of Changes in Strain Path on Work Hardening in Cp Aluminium and an Al-Cu-Mg Alloy", *Acta Metallurgica et Materialia*, Vol. 38, No. 2, pp. 215-226.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

ANALYSIS OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF SINGLE PASS DRAWN COPPER AND ALUMINUM BARS

Elaine Carballo Siqueira Corrêa, elaine@deii.cefetmg.br¹
Maria Teresa Paulino Aguilar, teresa@demc.ufmg.br²
Paulo Roberto Cetlin, pcetlin@demet.ufmg.br²

¹Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG, Avenida Amazonas 5253 Nova Suíça – Belo Horizonte/Minas Gerais - 30480-000.

²Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Rua Espírito Santo 35 Centro – Belo Horizonte/Minas Gerais - 30160-030.

Abstract: *The mechanical behavior of metals during and after forming operations is affected by various aspects, including the structural features of the material and the processing parameters. Regarding the axisymmetric drawing, one of the most significant aspects is the occurrence of a non-homogeneous deformation in the cross section of the material. This heterogeneity is related to an internal distortion process that takes place in the metal as it flows through the die, not contributing to the overall dimensional changes but supposedly increasing the drawing force and the average work hardening of the bar. In the present work, the mechanical behavior of single-pass drawn copper and aluminum bars was evaluated. Two operation conditions, involving one reduction of area and two die semi-angles, were used in the study. The drawn bars were considered as composed by concentric tubes or layers. The results, stress-strain curves obtained in tensile tests, revealed the influence of the operation parameters and the material structural features in the work hardening behavior of the bars. Finally, the prediction of the mechanical behavior of the drawn metal based on the operations parameters and the flow curve of annealed samples was analyzed.*

Key-words: *drawing, mechanical behavior, work hardening behavior, tensile test*