

AVALIAÇÃO DA DEFORMAÇÃO RESIDUAL UNIFORME DE BARRAS DE AÇO INOXIDÁVEL 420 TREFILADAS⁽¹⁾

Elaine Carballo Siqueira Corrêa⁽²⁾

Maria Teresa Paulino Aguiar⁽³⁾

Haroldo Béria Campos⁽⁴⁾

Paulo Roberto Cetlin⁽⁵⁾

Resumo

Neste trabalho, a previsão da deformação residual uniforme de barras de aço inoxidável AISI 420 trefiladas foi analisada. Os valores obtidos experimentalmente através de testes de tração foram comparados àqueles provenientes de um modelo teórico, desenvolvido a partir dos dados relativos ao metal apenas recozido. Três condições de trefilação foram consideradas no estudo, possibilitando a avaliação da influência da distribuição de deformação no mesmo. Além de observar o comportamento médio do material, a região central correspondendo a 50% do raio da barra trefilada também foi analisada. Os resultados indicaram que uma previsão adequada da ductilidade do material trefilado não deve considerar apenas a deformação média no processo, mas também os possíveis efeitos de caminho de deformação no comportamento dos metais.

Palavras-chave: Trefilação; Tração; Previsão; Ductilidade.

(1) Contribuição técnica a ser apresentada no 60º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, 25 a 28 de julho de 2005, Belo Horizonte - MG.

(2) Dr., Pesquisador/Bolsista de Pós - Doutorado do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia - UFMG, Belo Horizonte - MG. elaine@demet.ufmg.br

(3) Dr., Professor Adjunto do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, Escola de Engenharia - UFMG, Belo Horizonte - MG.

(4) Dr., Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia - UFMG, Belo Horizonte - MG.

Dr., Professor Titular do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia - UFMG, Belo Horizonte - MG.

INTRODUÇÃO

Modelos capazes de prever as propriedades mecânicas finais do produto em função das condições de processamento são de grande importância industrial, facilitando a obtenção de metais com características pré-definidas e favorecendo a implantação e otimização das operações.

No caso da trefilação, alguns trabalhos foram desenvolvidos com o objetivo de estimar a resistência mecânica (CADDELL e ATKINS 1968) e o alongamento total (JOHNSON e ROWE 1967) de barras. Os resultados, entretanto, não parecem ser satisfatórios, uma vez que ou não apresentam similaridade com os dados experimentais ou não representam um método geral, restringindo-se aos materiais e condições utilizadas nas investigações. Para a elaboração de um modelo adequado, as características da deformação na trefilação e os possíveis efeitos de caminho de deformação, já observados para outros processos de conformação, devem ser avaliados.

A deformação na trefilação é caracterizada pela ocorrência de um processo de distorção ou cisalhamento interno no metal, cuja magnitude decresce da superfície para o centro da amostra (Figura 1). Esse cisalhamento, que dá origem à deformação redundante, é responsável pela heterogeneidade de deformação ao longo da seção transversal do corpo de prova (CADDELL e ATKINS 1968, CETLIN 1984, CETLIN 1987) que, por sua vez, resulta em uma distribuição igualmente não uniforme de propriedades mecânicas na peça (MAJTA et al. 1992, SADOK et al. 1994, SADOK et al. 1994).

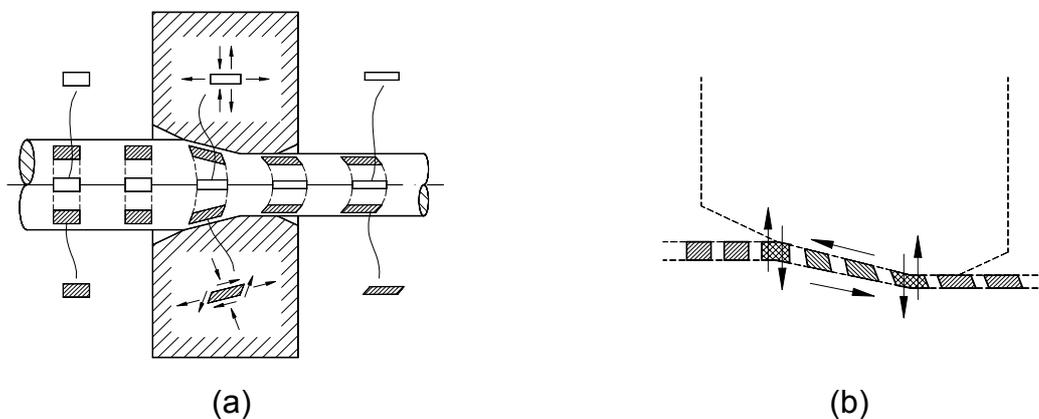


Figura 1. Representação esquemática da deformação durante na trefilação: (a) elementos ao longo da seção transversal da barra e (b) elementos próximos à superfície.

Em adição à ocorrência de deformação não homogênea no processo, a presença de diferentes trajetórias de deformação ao longo do raio da amostra é observada e, portanto, deve ser considerada na análise do comportamento subsequente do material trefilado. Apesar da importância do tema, as investigações vem sendo conduzidas especialmente para ensaios mecânicos usuais e processamento de chapas (WAGONER e LAUKONIS 1983, DOUCET e WAGONER 1989, LLOYD e SANG 1979, VIEIRA e Fernandes 1999; RAUCH et al. 2002), sem menção à

trefilação. Dessa forma, neste trabalho é avaliada a possibilidade de previsão da deformação uniforme no ensaio de tração barras de aço inoxidável 420 trefiladas.

MATERIAL E MÉTODOS

Material – O material empregado no trabalho foi o aço inoxidável AISI 420, cuja composição química (% em peso) é exibida na Tabela 1. O metal foi utilizado no estado em que foi adquirido, apresentando estrutura cristalina cúbica de corpo centrado e uma dureza Vickers média de $201,2 \pm 3,4$ HV.

Tabela 1. Composição química (% em peso) do aço inoxidável AISI 420.

C	Mn	Si	Cr	Ni
0,374%	0,403%	0,445%	12,720%	0,234%

Trefilação – A trefilação dos corpos de prova foi conduzida em uma máquina de ensaios mecânicos INSTRON modelo 4482, com sistema de controle e aquisição de dados série IX e um dispositivo especialmente construído para o processo. A operação foi realizada em um passe, a uma velocidade de $1,67 \times 10^{-1}$ mm/s, levando a valores de taxa de deformação de $3,34 \times 10^{-3}$ s⁻¹ a $2,35 \times 10^{-2}$ s⁻¹. Três condições de trefilação foram consideradas no trabalho, incluindo dois semi-ângulos de fieira α e duas reduções de área r , cujos detalhes são apresentados na Tabela 2, onde podem ser observadas também as deformações externas ou logarítmicas ϵ_{et} relativas a cada situação. Antes da operação, todas as amostras foram lubrificadas com bissulfeto de molibdênio.

Tabela 2. Condições de trefilação.

semi-ângulo de fieira α	redução de área r	deformação externa ϵ_{et}
20°	8%	0,083
20°	20%	0,223
3°	8%	0,083

Tração – Os ensaios de tração também foram realizados em uma máquina de ensaios INSTRON modelo 4482, com extensômetro eletrônico modelo 2630-100. Os experimentos foram conduzidos em corpos de prova recozidos e trefilados, a uma velocidade de $6,67 \times 10^{-2}$ mm/s, equivalendo a uma taxa de deformação inicial de $1,10 \times 10^{-3}$ s⁻¹. Em relação às amostras trefiladas, ressalta-se que os testes foram realizados nas barras diretamente após o processo ou após o descascamento (usinagem) da camada mais externa, equivalente a 50% do raio das mesmas. Este procedimento foi conduzido com o objetivo de avaliar os efeitos da deformação redundante nos resultados.

Análise da Deformação Residual Uniforme – Na Figura 2 pode ser observada a representação esquemática do modelo utilizado para o cálculo da deformação residual uniforme no ensaio de tração utilizado neste trabalho. O metal recozido exibe uma deformação uniforme ϵ_{eu} . Se uma amostra do mesmo é tracionada até um determinado valor ϵ_{et} , descarregada e novamente submetida ao teste de tração, a deformação uniforme neste segundo experimento é denominada deformação residual uniforme ϵ_{eur} , e obedece à equação 1, que está representada na Figura 2(b). Ressalta-se que esses valores, no entanto, representam a previsão teórica do

comportamento mecânico do material, associada à ocorrência de deformação homogênea no processo. Para o caso da análise das propriedades de barras trefiladas, a abordagem ou modelo apresentado na Figura 2 se torna questionável e é avaliada neste trabalho.

$$\varepsilon_{eur} = \varepsilon_{eu} - \varepsilon_{et} \quad (1)$$

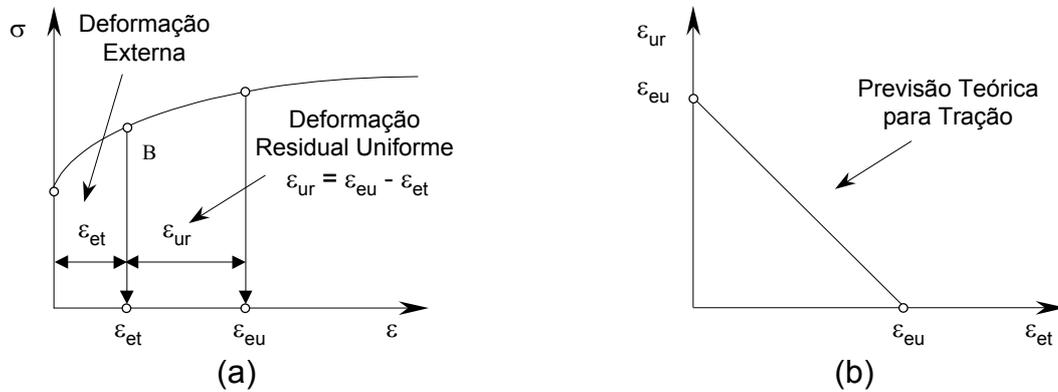


Figura 2. Representação esquemática do efeito da pré-deformação na deformação uniforme subsequente do metal (a) curva tensão efetiva-deformação efetiva e (b) curva deformação residual uniforme-prédeformação.

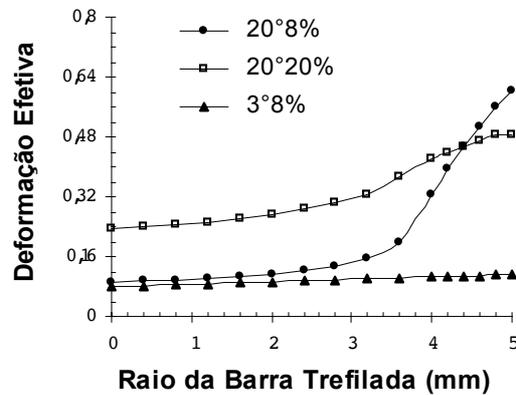
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 3 são mostrados os resultados de deformação uniforme apresentados pelas amostras recozidas e trefiladas. Em seguida, são exibidos os perfis de deformação das barras trefiladas (Figura 3) e as deformações médias calculadas a partir dos mesmos, tanto para as amostras inteiras como para as regiões centrais (Tabela 4), dados estes provenientes de um trabalho desenvolvido anteriormente (CORRÊA et al. 2001). Esses valores, em conjunto com as deformações externas relativas a cada condição de operação (Tabela 2), são utilizados para elaborar os gráficos da Figura 4.

Considerando inicialmente como valor de pré-deformação a deformação externa ε_{et} , verifica-se que, com exceção da condição $\alpha = 20^\circ$ e $r = 8\%$ - barra inteira (Figura 4(a)), os resultados experimentais se situam acima daqueles estimados teoricamente para a deformação residual uniforme ou fora da região de abrangência do modelo. No entanto, para uma avaliação mais precisa do comportamento do material, faz-se necessária a correção dos dados de ε_{et} pela deformação média ε_m no processo. Conforme mencionado anteriormente, o comportamento mecânico do material trefilado representa uma média das propriedades distribuídas ao longo do raio da barra. Esse perfil não homogêneo de propriedades, por sua vez, é resultado da já mencionada distribuição heterogênea de deformação. Dessa forma, os valores a serem utilizados na pré-deformação devem ser associados à média dos perfis da Figura 3. Com o deslocamento dos resultados experimentais no eixo das abcissas, da posição relativa a ε_{et} para ε_m , a situação para a qual $\alpha = 20^\circ$ e $r = 8\%$ - barra inteira também exibe resultados acima daqueles previstos teoricamente.

Tabela 3. Deformação residual uniforme ϵ_{eur} do aço inoxidável 420 recozido e trefilado.

região	material recozido	material trefilado		
		$\alpha = 20^\circ$, $r = 8\%$	$\alpha = 20^\circ$, $r = 20\%$	$\alpha = 3^\circ$, $r = 8\%$
barra inteira	0,118	0,013	0,015	0,055
camada central	----	0,047	0,015	0,058

**Figura 3.** Distribuição de Deformação efetiva ao longo da seção transversal das barras de aço inoxidável 420 trefiladas (CORRÊA et al. 2001).**Tabela 4.** Deformação média ϵ_m do aço inoxidável 420 trefilado.

região	material trefilado		
	$\alpha = 20^\circ$, $r = 8\%$	$\alpha = 20^\circ$, $r = 20\%$	$\alpha = 3^\circ$, $r = 8\%$
barra inteira	0,255	0,378	0,101
camada central	0,108	0,264	0,090

Ainda que os resultados estejam também relacionados aos aspectos da deformação na trefilação e, conseqüentemente, à distribuição não uniforme da mesma inerente ao processo, verifica-se que a simples utilização do valor de deformação média em vez da deformação externa não parece ser o único fator a ser considerado na análise da deformação residual uniforme do metal. A ocorrência de pontos acima da curva $\epsilon_{eur} - \epsilon_{et}$ indica, a princípio, que o processamento prévio por trefilação levaria a um encruamento menos acentuado do metal se comparado a amostras apenas tracionadas. Resultados similares foram apresentados em outros trabalhos nos quais os efeitos de caminho de deformação no encruamento de materiais era avaliado (LLOYD e SANG 1979, DOUCET e WAGONER 1989), mostrando inclusive uma relação entre as alterações na resistência mecânica e na ductilidade das amostras: para as situações nas quais a alteração na trajetória de deformação levava a um aumento na resistência, um decréscimo no dados de ϵ_{ur} era observado e vice-versa.

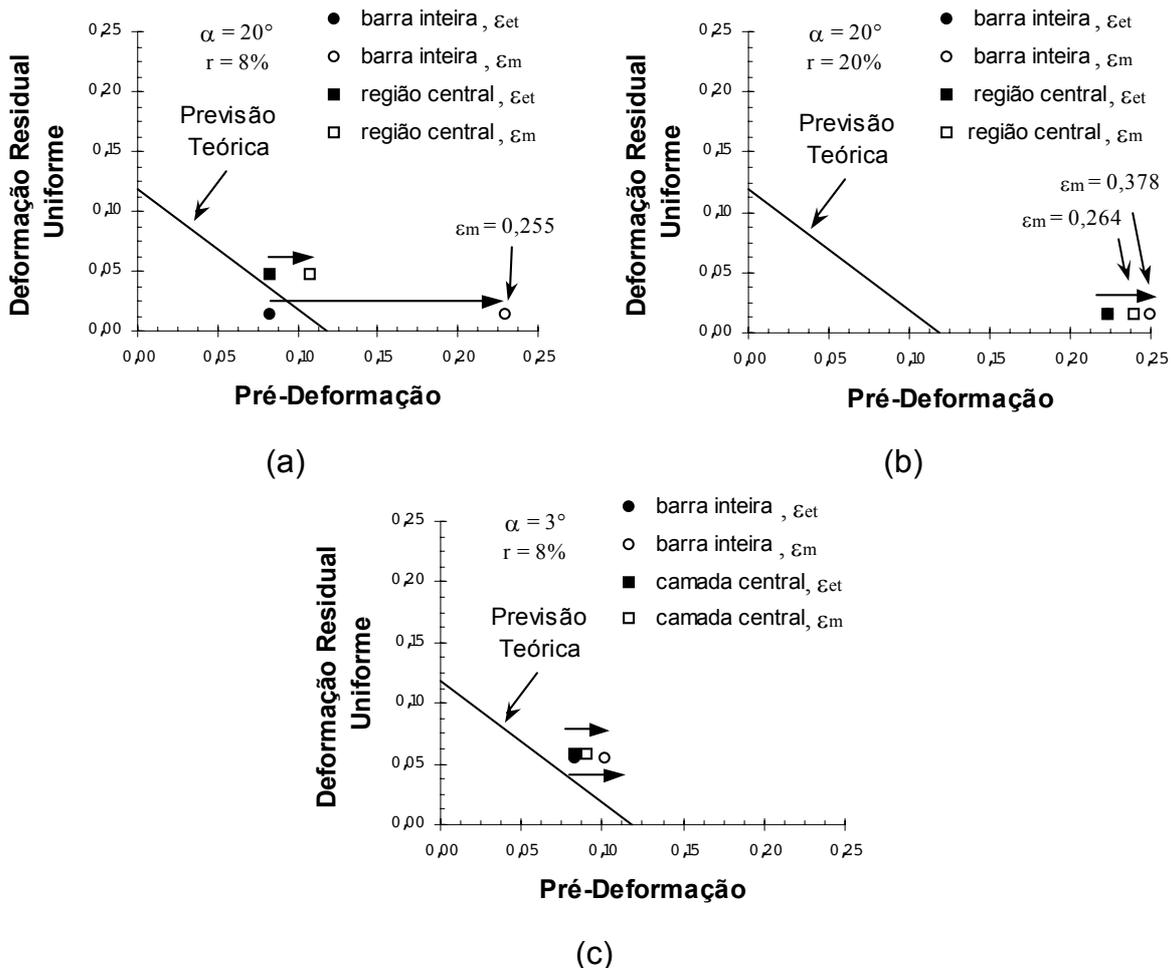


Figura 4. Deformação residual uniforme das barras de aço inoxidável 420 trefiladas - modelo teórico e resultados experimentais: (a) $\alpha = 20^\circ$ e $r = 8\%$, (b) $\alpha = 20^\circ$ e $r = 20\%$ e (c) $\alpha = 3^\circ$ e $r = 8\%$.

Na Figura 5 são exibidas as curvas das barras trefiladas inteiras e das camadas centrais das mesmas para $\alpha = 20^\circ$ e $r = 8\%$ e $\alpha = 3^\circ$ e $r = 8\%$, superpostas àquela obtida no teste de tração do metal recozido (CORRÊA et al. 2004). Os dados relativos ao material trefilado são deslocados no eixo das abscissas, e os valores considerados como pré-deformação correspondem às deformações médias apresentadas na Tabela 4. Para $\alpha = 20^\circ$ e $r = 8\%$, verifica-se que, em geral, as curvas dos corpos de prova trefilados situam-se abaixo dos resultados da amostra recozida, fenômeno mais acentuado para a barra trefilada inteira, em concordância com os resultados da Figura 4. Para $\alpha = 3^\circ$ e $r = 8\%$, a influência da alteração na trajetória de deformação no encruamento do material é mais sutil, assim como para a região central da outra condição, e tanto os valores de resistência mecânica como os de deformação residual uniforme situam-se mais próximos dos dados estimados a partir da tração pura.

Por fim, em relação a $\alpha = 20^\circ$ e $r = 20\%$, observa-se que o valor de pré-deformação aplicado supera a deformação uniforme da amostra recozida e que a princípio seria esperado $\epsilon_{ur} = 0$. No entanto, verifica-se que os valores para ambos os corpos de prova são iguais a 0,015. Resultados experimentais obtidos previamente para o aço baixo carbono, em condições similares às aquelas acima mencionadas, indicaram a ocorrência de estabilidade da deformação residual na faixa de 0,007 a 0,02 (SILVA e CETLIN 1994).

Dessa forma, os resultados apresentados mostram a importância da análise conjunta das características da deformação no processo de trefilação e dos efeitos do caminho de deformação no comportamento mecânico posterior do metal trefilado. Ambos fenômenos representam etapas essenciais na previsão das propriedades posteriores do material bem como em uma possível modelagem da operação.

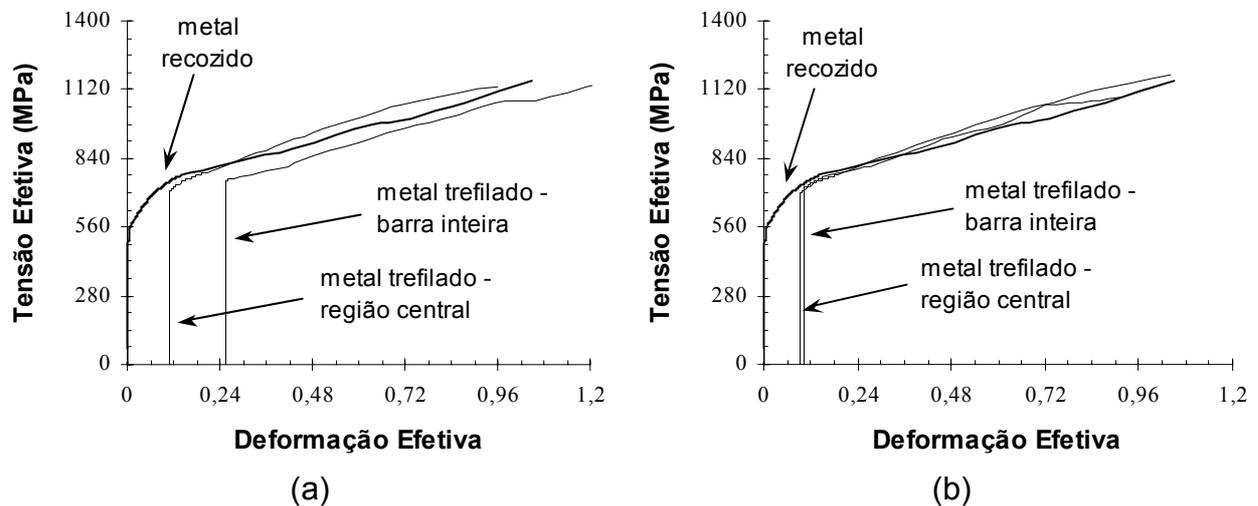


Figura 5. Curvas tensão efetiva - deformação efetiva do aço inoxidável 420 trefiladas superpostas na curva de escoamento do material recozido: (a) $\alpha = 20^\circ$ e $r = 8\%$ e (b) $\alpha = 3^\circ$ e $r = 8\%$ (CORRÊA 2004).

CONCLUSÕES

Os resultados experimentais de deformação residual uniforme das barras de aço inoxidável 420 trefiladas não coincidem com aqueles determinados através do modelo teórico, e as diferenças são mais pronunciadas para as situações onde a heterogeneidade de deformação na trefilação é mais acentuada. A utilização de um valor médio de deformação na análise também não conduz a resultados satisfatórios. As diferenças observadas são associadas a efeitos de caminho de deformação no encruamento de metais, fenômeno que deve ser considerado nas abordagens apresentadas para a previsão do comportamento mecânico dos mesmos.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPQ, à CAPES e ao PRONEX/MCT pelo apoio financeiro, ao CDTN/CNEN pelo jateamento dos corpos de prova e à Belgo Mineira Bekaert Artefatos pela doação das feiras de trefilação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 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.

- 2 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, 1984.
- 3 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, 1987.
- 4 CORRÊA, E. C. S.; SILVA, R. F.; AGUILAR, M. T. P.; CETLIN, P. R. Análise da deformação na trefilação de barras de aços inoxidáveis utilizando elementos finitos. In: 56º Congresso Anual da ABM, 2001, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: Brasil, 2001.
- 5 CORRÊA, E. C. S.; SILVA, R. F.; AGUILAR, M. T. P.; CETLIN, P. R. Análise do comportamento mecânico à tração de barras de aço inoxidável AISI 420 trefiladas. In: XVI Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – CBECIMAT, 2004, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: Brasil, 2004.
- 6 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.
- 7 JOHNSON, R.W., ROWE, G.W. Prediction the ductility of drawn wire. **The Wire Industry**, p. 61-62, January 1967.
- 8 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.
- 9 MAJTA, J., LUKSZA, J., SADOK, L. The estimation of mechanical properties distribution in plastic working products: example for drawing process. **Journal of Materials Processing and Technology**, v. 34, p. 389-396, 1992.
- 10 RAUCH, E. F., GRACIO, J. J., BARLAT, F., LOPES, A. B., DUARTE, J. F. Hardening behavior and structural evolution upon strain reversal of aluminum alloys. **Scripta Materialia**, v. 46, p. 881-886, 2002.
- 11 SADOK, L., LUKSZA, J., MAJTA, J. Inhomogeneity of mechanical properties in stainless steel rods after drawing. **Journal of Materials Processing and Technology**, v. 44, p. 129-141, 1994.
- 12 SADOK, L., LUKSZA, J., MAJTA, J., SKOLYSZEWSKI, A. Analysis of inhomogeneity of mechanical properties in stainless steel rods after drawing. **Journal of Materials Processing and Technology**, v. 45, p. 293-298, 1994.
- 13 SILVA, A.P., W.A., CETLIN, P.R. Modelamento matemático do alongamento à tração de barras de aço ABNT 1008 após trefilação. In: 49º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, 1994, São Paulo. **Anais...** p. 271-278.
- 14 VIEIRA, M. F., FERNANDES, J. V. Complex strain paths in polycrystalline copper: microstructural aspects. **Materials Research**, v. 2, n. 3, p. 185-189, 1999.
- 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.

EVALUATION OF THE RESIDUAL UNIFORM STRAIN OF 420 STAINLESS STEEL DRAWN BARS

*Elaine Carballo Siqueira Corrêa
Maria Teresa Paulino Aguilar
Haroldo Béria Campos
Paulo Roberto Cetlin*

Abstract

In this investigation, the prediction of the residual uniform strain of AISI 420 stainless steel drawn bars was analyzed. The experimental values, obtained in tension tests, were compared to those associated with a theoretical model, which had been developed employing the data related to the annealed metal. Three drawing conditions were considered in the study, allowing the evaluation of the influence of the deformation distribution on the mechanical property of the bars. This procedure was conducted in the full section and in the central 50% nucleus of the drawn material. The results showed that an adequate prediction of the ductility of the drawn metal involves not only the use of an average value for deformation in drawing but also the analysis of the strain path effects on the work hardening behavior of the metal.

Key-words: Drawing; Tension; Prediction; Ductility.