

ANÁLISE DA DEFORMAÇÃO NA TREFILAÇÃO DE BARRAS DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 420 PELO MÉTODO DE VISIOPLASTICIDADE ¹

*Elaine Carballo Siqueira Corrêa²
Carlos Augusto dos Santos³
Paulo Roberto Cetlin⁴*

Resumo

Neste trabalho, a deformação durante e após a trefilação em um passe de barras de aço inoxidável AISI 420 é analisada pela técnica experimental de visioelasticidade. São avaliadas seis condições de processamento, envolvendo três semi-ângulos de fiação e duas reduções de área. Os resultados, além de confirmar a influência dos parâmetros geométricos do processo, possibilitam a determinação de uma relação linear entre o coeficiente de deformação redundante e o parâmetro geométrico Δ .

Palavras-chave: Trefilação; Distribuição de deformação; Visioelasticidade.

ANALYSIS OF THE DEFORMATION IN DRAWING OF AISI 420 STAINLESS STEEL BARS THROUGH THE VISIOELASTICITY TECHNIQUE

Abstract

In this paper, the strain distribution in the cross section of drawn AISI 420 stainless steel bars has been evaluated through the visioelasticity technique. Six processing conditions are considered in the analysis, comprising three die semi-angles and two are reductions. The results show the influence of these parameters on the deformation in drawing as well as allow the determination of a linear expression relating the redundant deformation factor and the Δ parameter.

Key words: Drawing; Deformation distribution; Visioelasticity.

¹ Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

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., Pesquisador/Bolsista de Pós - Doutorado do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia - UFMG, Belo Horizonte.

⁴ Dr., Professor Titular do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia - UFMG, Belo Horizonte - MG.

INTRODUÇÃO

O estudo da deformação na trefilação tem sido conduzido por meio de diversos métodos, incluindo abordagens experimentais, teóricas e numéricas.⁽¹⁻⁸⁾ A avaliação da sua distribuição ao longo seção transversal do metal e/ou a determinação do fator de deformação redundante $\phi^{(4)}$ (relação entre a deformação média e a deformação externa) representam o principal objetivo destes trabalhos, cuja relevância está associada à análise do comportamento mecânico subsequente do material e das características do processo.

Dentre as técnicas sugeridas, a visioplasticidade, procedimento desenvolvido por Thomsen,^(9,10) aparece como um dos mais promissores, e integram tanto o trabalho experimental como o estudo analítico dos mecanismos de deformação plástica durante a conformação mecânica.⁽¹⁰⁾ O método é baseado no estabelecimento experimental de um campo de vetores de velocidade a partir da distorção das linhas de uma rede previamente marcada na amostra, e levam à determinação posterior de campos de taxa de deformação e deformação, utilizando equações de equilíbrio e plasticidade. Este procedimento possibilita um estudo detalhado do escoamento do metal^(10,11) e representa a solução mais próxima da real para a análise do seu comportamento em diversas operações.⁽¹²⁾ No entanto, a técnica tem sido predominantemente aplicada a problemas associados à extrusão,^(9,11,13-15) sendo considerada um trabalho relativamente complexo.^(9,13) Para o caso da trefilação, apesar da importância, a visioplasticidade vem sendo utilizada com menos frequência. As poucas investigações são centradas apenas no estudo da distribuição da deformação no metal, para algumas condições de operação, e envolvem ainda uma eventual comparação dos resultados obtidos com aqueles observados por outros métodos.^(5,6)

Neste trabalho, são analisadas as distribuições de deformação efetiva de barras de aço inoxidável AISI 420 durante e após a trefilação em um passe através da técnica de visioplasticidade, incluindo a determinação da relação entre o coeficiente de deformação redundante e as condições de operação (seis no total, envolvendo três semi-ângulos de fieira e duas reduções de área), representadas pelo parâmetro geométrico Δ .

MATERIAL E MÉTODOS

Material – O material analisado neste trabalho é o aço inoxidável AISI 420, com a seguinte composição química (% em peso): 0,377%C, 0,419%Mn, 0,275%Si, 13,7%Cr, 0,3%Ni. Apesar de pertencer à classe dos aços inoxidáveis martensíticos, o metal foi utilizado em seu estado ferrítico (matriz de ferrita com carbonetos de cromo uniformemente distribuídos), obtido através de recozimento isotérmico, realizado de acordo com os seguintes parâmetros: encharque a 970°C durante 3600s, resfriamento a uma taxa de 4°C/min e encharque a 705°C durante 7200s.

Corpos-de-Prova – Atendendo ao princípio de realização da técnica de visioplasticidade, os corpos-de-prova foram confeccionados bipartidos, ou seja, consistiram em duas peças a serem unidas nas extremidades por parafusos. Na Figura 1 pode ser observada a sua representação (uma das partes). O formato adotado possibilitou a obtenção, em um mesmo par de amostras, de resultados relativos às duas reduções de área r consideradas no trabalho. Dessa forma, foram preparadas duplas distintas apenas de acordo com o semi-ângulo α utilizado no

processo. Por fim, após a usinagem, foi impressa uma rede quadriculada de 1mm x 1mm nas superfícies planas das peças através de ataque eletrolítico.

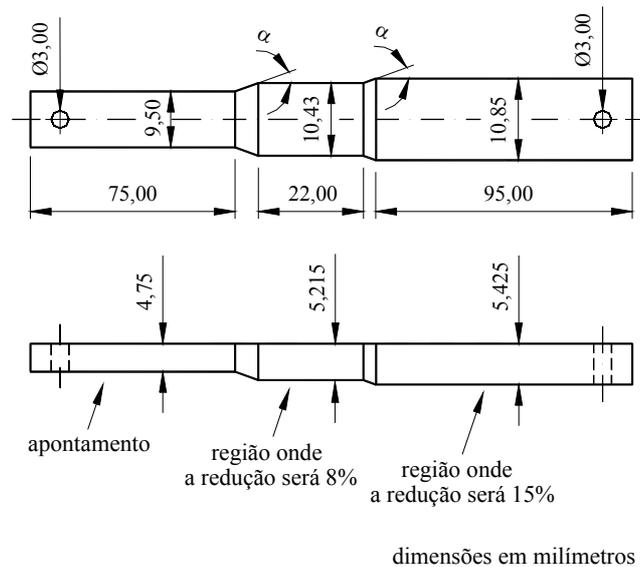


Figura 1. Representação do corpo de prova (uma das partes) utilizado para a visioelasticidade (dimensões em milímetros).

Visioelasticidade / Trefilação – A trefilação dos corpos-de-prova foi realizada em um passe em uma máquina de ensaios mecânicos Instron 5582, com um dispositivo especialmente projetado para a operação. São avaliadas seis condições de processamento, combinação de três semi-ângulos de feira α (20° , 8° e 3°) e duas reduções de área r (8% e 15%). Os experimentos foram conduzidos a uma velocidade de $1,67 \times 10^{-1} \text{ mm/s}$, levando a taxas de deformação de $3,34 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ a $2,46 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ (valores determinados de acordo com α e r). Antes da operação, todas as barras foram lubrificadas com bissulfeto de molibdênio. Em relação ao procedimento, o processo de trefilação foi realizado até cerca da metade do comprimento útil da região dos corpos-de-prova, equivalente à redução de área de 8%. Após a interrupção do mesmo, as peças foram separadas e as imagens de distorção da rede foram digitalizadas, incluindo a zona de deformação. Em seguida, as amostras foram novamente unidas e um procedimento similar foi realizado para a parte da barra, onde $r = 15\%$.

Visioelasticidade / Cálculos – Os cálculo específicos dos campos de vetores de velocidade, de taxa de deformação e de deformação foram conduzidos segundo o método clássico apresentado por Thomsen^(9,11,15). A primeira fase desta etapa, entretanto, envolvendo a determinação da função de fluxo nas peças, foi realizada de acordo com a metodologia desenvolvida por Shabaik⁽¹⁶⁾, na qual foi obtida uma expressão descrevendo o comportamento do metal baseada na separação de funções principais e no método dos mínimos quadrados. Este procedimento de tratamento de dados foi adotado com o objetivo de minimizar a possível propagação de erros das medições experimentais em decorrência da utilização posterior de derivações de primeira e segunda ordens na análise.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Figuras 2 e 3 são exibidos as imagens de distorção da rede das amostras trefiladas e os gráficos associados às mesmas, nos quais pode ser observada a evolução da deformação efetiva ao longo do raio do metal durante a operação. Em relação às curvas deformação-raio das barras, ressalta-se que os dados são ascendentes durante a passagem do material pela fieira, ou seja, os pontos mais próximos do eixo das abscissas equivalem ao início da deformação; os pontos mais elevados representam a deformação efetiva final do metal após o processo.

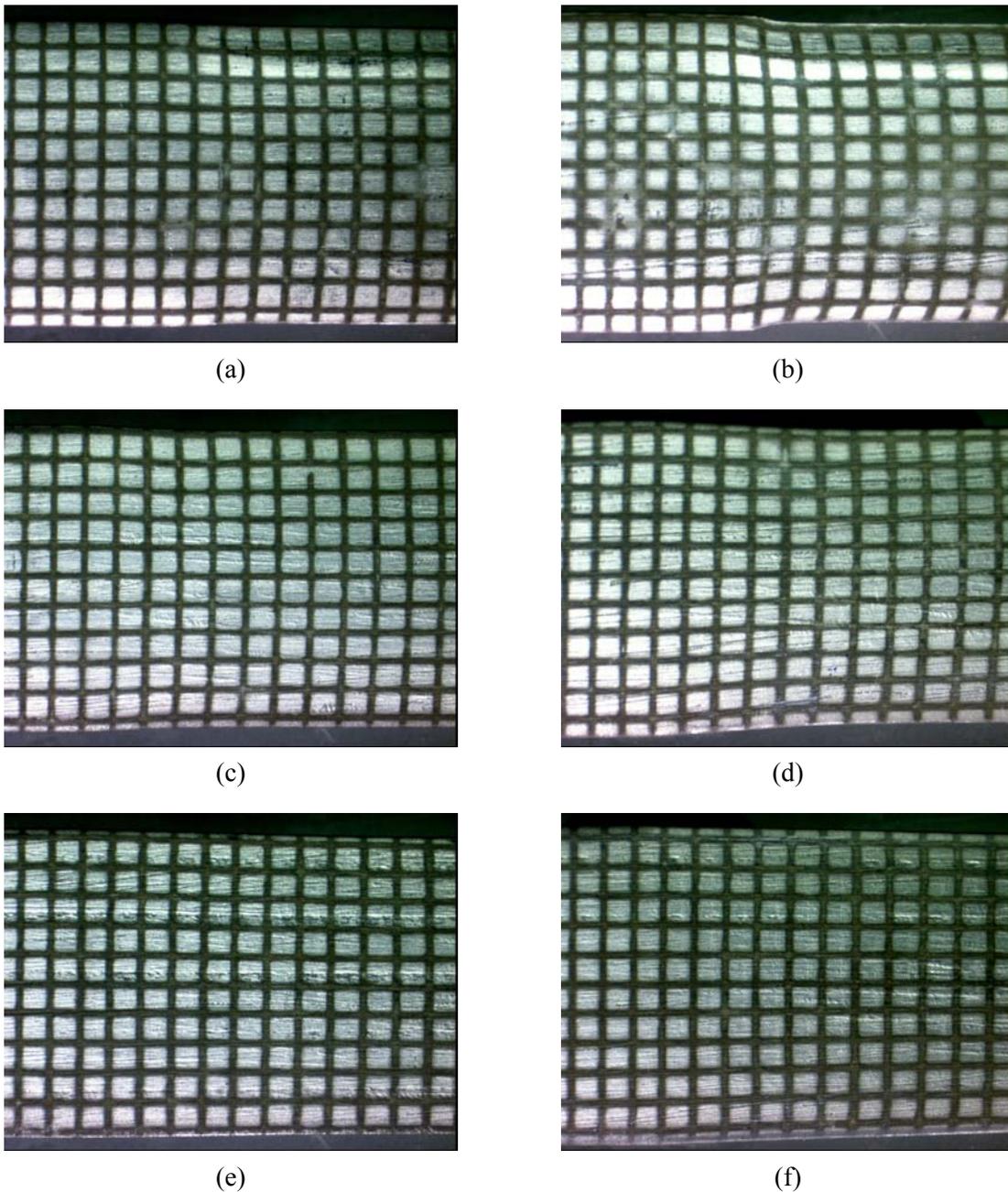


Figura 2. Imagens da rede das barras de aço inoxidável AISI 420: (a) $\alpha = 20^\circ/r = 8\%$, (b) $\alpha = 20^\circ/r = 15\%$, (c) $\alpha = 8^\circ/r = 8\%$, (d) $\alpha = 8^\circ/r = 15\%$, (e) $\alpha = 3^\circ/r = 8\%$, (f) $\alpha = 3^\circ/r = 15\%$.

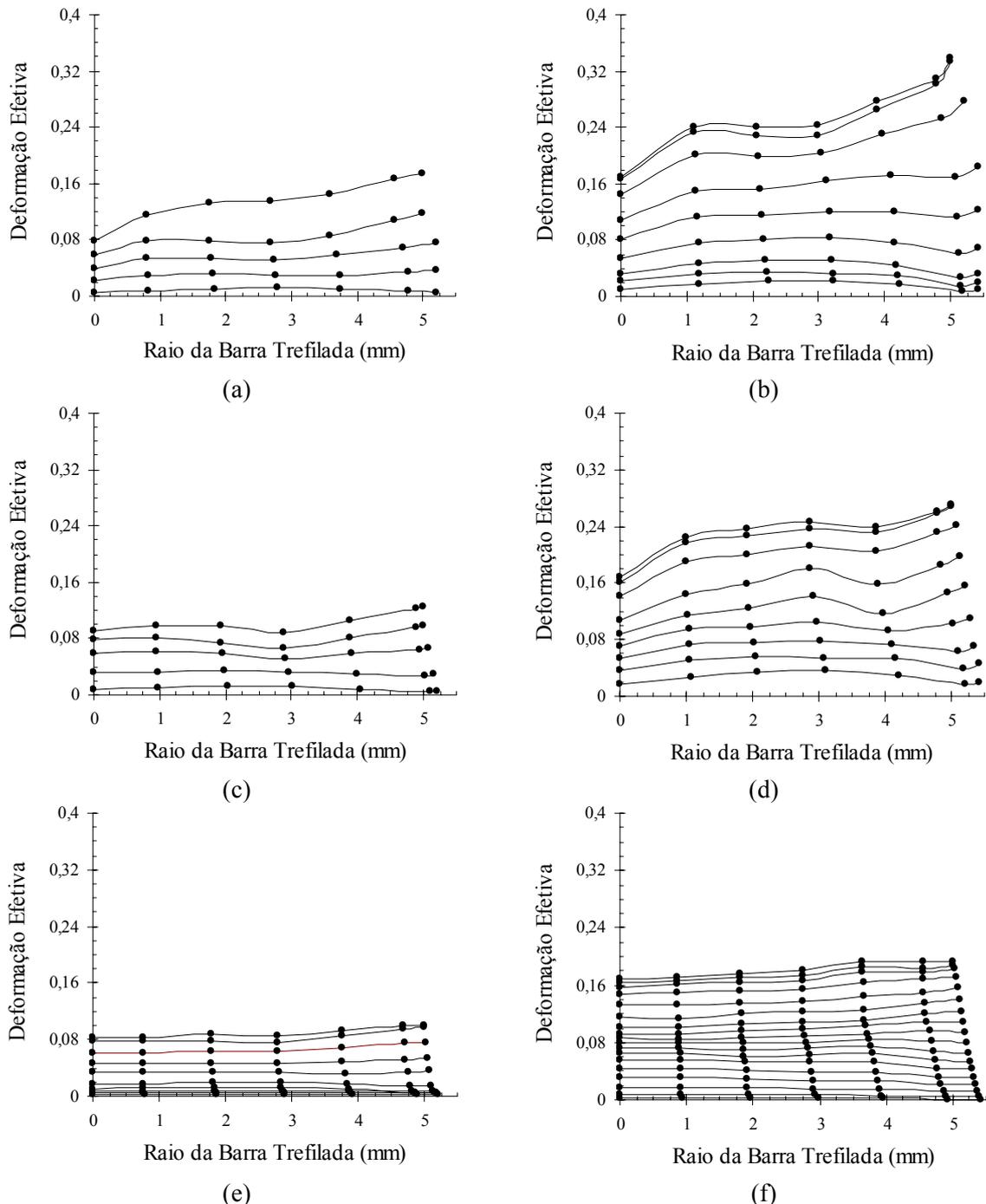


Figura 3. Evolução da distribuição de deformação efetiva ao longo da seção transversal das barras de aço inoxidável AISI 420 durante e após o processo de trefilação: (a) $\alpha = 20^\circ / r = 8\%$, (b) $\alpha = 20^\circ / r = 15\%$, (c) $\alpha = 8^\circ / r = 8\%$, (d) $\alpha = 8^\circ / r = 15\%$, (e) $\alpha = 3^\circ / r = 8\%$, (f) $\alpha = 3^\circ / r = 15\%$.

De maneira geral, os resultados evidenciam a influência do semi-ângulo de fieira e da redução de área no perfil de deformação das barras. A análise qualitativa das imagens mostra que a modificação na rede se torna mais pronunciada com o aumento de α e r . Observando inicialmente a distribuição de deformação do metal após a operação, verifica-se que as curvas deformação-raio da barra, correspondentes ao semi-ângulo de 20° apresentam clara heterogeneidade, enquanto aquelas relativas ao semi-ângulo de 3° são praticamente uniformes. Considerando os demais resultados, referentes à evolução ou comportamento do material durante o processo, nota-se que, para as condições nas quais $\alpha = 8^\circ$ e

principalmente $\alpha = 20^\circ$, a alteração no reticulado aparece antes mesmo do metal entrar em contato com a matriz, na porção central do mesmo, em uma região onde ainda não há alterações nas dimensões da amostra. Este fato também pode ser observado nas curvas da Figura 3, que mostram essa deformação mais pronunciada na região central sendo gradualmente revertida em relação à superfície da peça à medida que a mesma entra na feira.

Resultados qualitativamente similares àqueles mostrados nas Figuras 2 e 3 em termos de deformação final das barras são apresentados anteriormente para outros metais trefilados (alumínio, cobre, aços inoxidáveis austeníticos), analisados, em sua maioria, por meio de outras técnicas, como os métodos dos perfis de microdureza^(1,2) e de elementos finitos.^(5,7,8) Além da determinação das distribuições de deformação, alguns destes trabalhos^(1,2) abordam ainda o cálculo da deformação média ε_m e do coeficiente de deformação redundante ϕ na operação, e a relação do mesmo com as condições do processo, evidenciada pelas curvas $\phi \times$ parâmetro geométrico Δ ⁽⁴⁾. Este tipo de análise também é conduzido fazendo uso da técnica de superposição das curvas tensão-deformação,^(4,17) através da qual ε_m é determinada diretamente pela comparação entre curvas de escoamento à tração de amostras recozidas e trefiladas. No entanto, para as investigações nas quais a trefilação foi avaliada através de visioplasticidade,^(5,6) este estudo não foi realizado.

Dessa forma, na Figura 4 são novamente apresentados os dados de deformação efetiva final do aço inoxidável AISI 420, acompanhados de curvas correspondentes a um ajuste com polinômio do 3º grau. A partir das mesmas, podem ser calculados os valores de deformação média $\varepsilon_{mvisiop}$ e de coeficiente de deformação redundante ϕ_{visiop} para as seis condições de trefilação, considerando a média do parabolóide de revolução que representa a variação da deformação em todas as regiões ao longo da seção transversal das amostras.⁽²⁾ Na Tabela 1 são exibidos os resultados, bem como os valores do parâmetro Δ para cada condição de processamento.

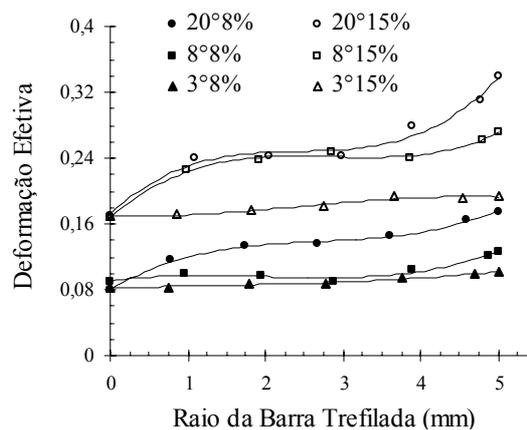


Figura 4. Perfis de deformação das barras de aço inoxidável AISI 420 após o processo de trefilação – curvas aproximadas por polinômio de 3º grau.

Tabela 1. Valores de deformação média e coeficiente de deformação redundante das barras de aço inoxidável AISI 304 obtidos por meio da técnica de visioelasticidade.

Condição de trefilação	Parâmetro Δ	$\epsilon_{mvisiop}$	ϕ_{visiop}
$\alpha = 20^\circ, r = 8\%$	16,75	0,146	1,754
$\alpha = 20^\circ, r = 15\%$	8,60	0,266	1,638
$\alpha = 8^\circ, r = 8\%$	6,70	0,104	1,249
$\alpha = 8^\circ, r = 15\%$	3,44	0,246	1,514
$\alpha = 3^\circ, r = 8\%$	2,51	0,091	1,091
$\alpha = 3^\circ, r = 15\%$	1,29	0,186	1,144

Na Figura 5 podem ser observados os valores do coeficiente de deformação redundante, mostrados na Tabela anterior, locados em função do parâmetro Δ , a partir dos quais é determinada uma relação linear monotônica entre ϕ_{visiop} e Δ , também exibida no gráfico.

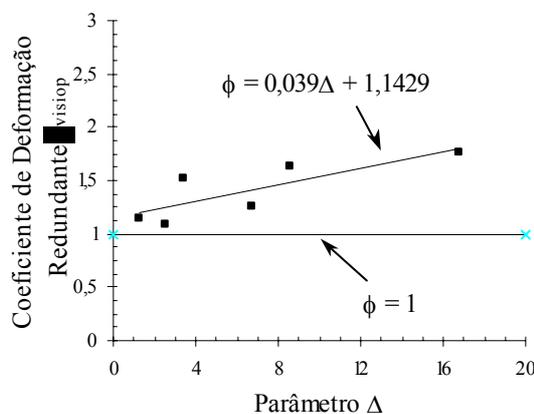


Figura 5. Curvas coeficiente de deformação redundante x parâmetro geométrico Δ - valores determinados pela técnica de visioelasticidade.

CONCLUSÕES

- Os resultados apresentam a influência do semi-ângulo de fieira e da redução de área nos perfis de deformação das barras de aço inoxidável AISI 420 durante e após o processo de trefilação. São observadas distribuições de deformação efetiva finais mais heterogêneas com o aumento do valor de α . Para as situações nas quais $\alpha = 8^\circ$ e principalmente, $\alpha = 20^\circ$, verifica-se a ocorrência de deformação na região central das amostras antes mesmo de entrar em contato com fieira, em uma região onde ainda não há alterações nas dimensões da peça.
- É determinada uma relação linear entre o coeficiente de deformação redundante e o parâmetro geométrico Δ com os resultados obtidos pela técnica de visioelasticidade para barras de aço inoxidável AISI 420.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPQ e à CAPES, pelo apoio financeiro, e à Belgo Mineira Bekaert Artefatos, pela doação das fieiras de trefilação.

REFERÊNCIAS

- 1 BACKOFEN, W.A. **Deformation Processing**. 1 ed. Massachusetts: Addison Wesley Reading, 1972. 326p.
- 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, April 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, 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 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.
- 6 SADOK, L., LUKSZA, J., PACKO, M., BURDEK, M. Analysis of the Strain State in the Stainless Steel Rods After Drawing. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 45, p. 305-310, 1994.
- 7 GIFFORD, R.B., BANDAR, A.R., MISIOLEK, W.Z., COULTER, J.P. A Numerical Investigation of the Wire Drawing Process. In: *8th International Conference on Metal Forming - Metal Forming*, 2000, Cracóvia. **Anais...** p. 597-604.
- 8 DIXIT, U.S., DIXIT, P.M. An Analysis of the Steady-State Wire Drawing of Strain Hardening Materials. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 47, p. 201-229, 1995.
- 9 SHABAIK, A., KOBAYASHI, S. Computer Application to the Visioplasticity Method. **Journal of Engineering for Technology**, p. 1-8, November 1966.
- 10 THOMSEN, E.G., YANG, C.T., KOBAYASHI, S. **Mechanics of Plastic Deformation in Metal Processing**. 1 ed. New York: The Macmillan Company, 1965. 486p.
- 11 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.
- 12 ROWE, G.W. **Principles of Industrial Metal Working Processes**. 4 ed. London: Edward Arnold, 1977. 407p.
- 13 WANG, J.P. A New Approach to Visioplasticity in Plane-Strain Extrusion. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 79, p. 144-154, 1998.
- 14 KIMURA, K., ISHII, M., YOSHIMURA, H. An Analysis of Deformation, Temperature and Microstructure for Hot Extruded Titanium Alloy. **Metallurgical Transactions**, v. 24B, p. 139-144, 1993.
- 15 KIMURA, K., ISHII, M., YOSHIMURA, H. An Analysis of Deformation, Temperature and Microstructure for Hot Extruded Titanium Alloy. **Metallurgical Transactions**, v. 24B, p. 139-144, 1993.
- 16 SHABAIK, A.H. Computer-Aided Visioplasticity Solution to Axisymmetric Extrusion Through Curved Boundaries. **Journal of Engineering for Technology**, p. 1225-1231, November 1972.
- 17 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.