

CARACTERÍSTICAS DO FLUXO PLÁSTICO EM MATRIZES CÔNICAS CONVERGENTES NO PROCESSO DE EXTRUSÃO

José Antonio de Castro Silva

João Sandoval Bittencourt de Oliveira

Universidade Federal do Pará, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica, 66075-900, Belém, PA, Brasil. E-mail: castro@ufpa.br

Resumo

De um modo geral, pode-se dizer que o objetivo principal da análise de um problema de conformação plástica é prever os valores locais da taxa de deformação, da deformação, da temperatura e das tensões atuantes no curso de uma conformação plástica. O presente trabalho analisa as características do fluxo plástico em matrizes cônicas convergentes, considerando que um material plástico flui estacionariamente para o ápice virtual de um cone. Como método de solução adotou-se o critério de escoamento de *von Mises*. Os valores computados tem como finalidade uma melhor compreensão da mecânica dos processos de conformação plástica em extrusão. Os resultados demonstram que esta modelagem descreve o comportamento do fluxo plástico de um material plástico ideal, homogêneo e isotrópico, sem endurecimento, sob processo de extrusão em matrizes cônicas convergentes.

Palavras-chave: Taxa de deformação, Tensões, Extrusão, Matrizes

1. INTRODUÇÃO

Muito embora a teoria da plasticidade incorpore um número suficiente de equações independentes para distribuições do campo de tensões e de deformações no curso de um processo de conformação plástica, uma solução exata, sob condições realísticas, cobrindo todos os intervalos de variação dos parâmetros envolvidos é difícil de ser obtida, uma vez que esta solução deverá satisfazer não só às relações constitutivas, mas também às condições de contorno, estatísticas e cinemática.

Na solução desse problema tem sido utilizadas técnicas, como a da viscoplasticidade, na interpretação de resultados experimentais (Medrano, Gillis, Hinesley & Conrad, 1971; Medrano & Gillis, 1972) e a do limite superior (Delijaicov, 1978; Avitzur, 1979; Stahberg & Hou, 1995; Talbert & Avitzur, 1996).

É importante salientar, que os livros tradicionais sobre a teoria da plasticidade concebem a mecânica do fluxo plástico como uma extensão natural da mecânica dos sólidos. Com isso, o seu interesse se volta para as tensões, as deformações e para o critério de escoamento plástico que difere do fluxo que se verifica nos escoamentos elásticos.

Talbert e Avitzur conceberam o fluxo plástico como o de um fluido, e as atenções são voltadas para o campo de velocidades, taxas de deformações e para a potência requerida no processo

Nesta análise, formularam-se as equações e hipóteses simplificadoras para obtenção dos campos de velocidades cinematicamente admissíveis, das taxas de deformações e das tensões atuantes na zona de deformação. Os resultados obtidos descrevem, pelo menos qualitativamente, o fenômeno.

2. MODELAGEM DO FLUXO PLÁSTICO

Neste trabalho, considera-se uma barra cilíndrica de diâmetro D_0 , de um material idealmente plástico, e uma matriz cônica suficientemente rígida. O material extrudado emerge como uma barra cilíndrica de diâmetro D , como mostrado na Figura 1.

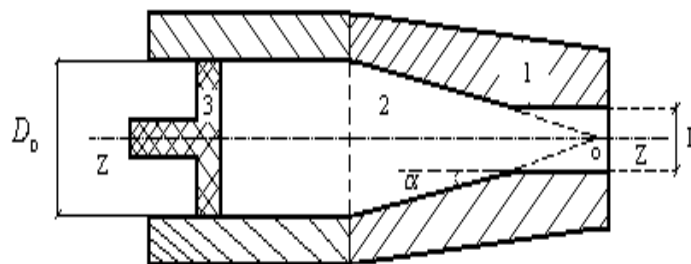


Figura 1. Matriz de Extrusão: 1 – Bocal redutor; 2 – Zona de deformação; 3 – Êmbolo; o – Ápice virtual do cone

Adotou-se a teoria do fluxo, pois ela considera incrementos infinitesimais de distorções, para as quais as tensões instantâneas estão relacionadas aos incrementos de taxas de deformações.

As hipóteses simplificadoras utilizadas para a solução do problema foram:

- O material é homogêneo e isotrópico e não sofre encruamento durante o processo de conformação;
- Os eixos principais do tensor tensão, são coincidentes com os eixos principais do tensor taxa de deformação, durante todo o processo de extrusão;
- O material é um rígido-plástico ideal ou material de von Mises, e portanto o modelamento proposto não considera os efeitos viscoelásticos;
- A deformação se processa a volume constante (Kudo, 1960; Balai, Sudararajan & Lal, 1991; Shabaik, 1991);
- Um fluxo estacionário converge para o ápice virtual do cone, o que permite a definição do campo de velocidades cinematicamente admissíveis na zona de deformação, como indicado na Figura 2, (Talbert & Avitzur, 1996);

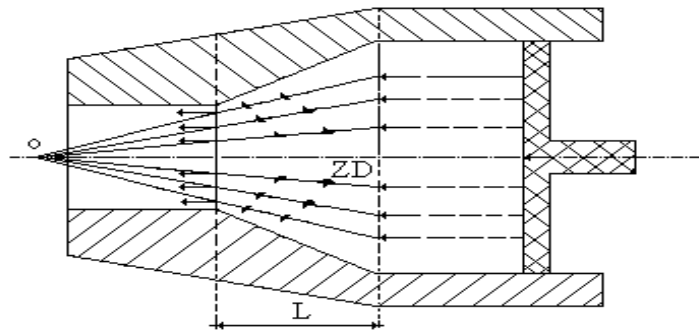


Figura 2. Ilustração de um fluxo convergente para o ápice virtual do cone (o), na zona de deformação (ZD)

f) O comprimento L da zona de deformação é suficientemente longo para desprezar-se os efeitos de contribuições finais;

g) Adota-se um sistema de coordenadas esférico-polares (r, ϕ, θ) , como indicado na Figura 3;

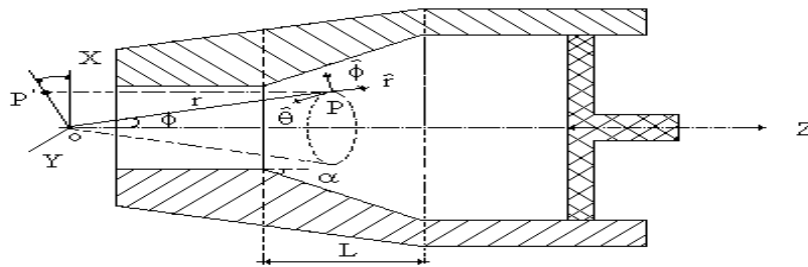


Figura 3. Sistema de coordenadas esférico-polares no modelamento do fluxo

h) A tensão friccional exercida pela parede interna da matriz sobre o material em extrusão terá valor constante e igual a $m\tau_{\max}$, onde $0 \leq m \leq 1$ e τ_{\max} é a máxima tensão de cisalhamento que o material pode suportar sob tração uniaxial (Sachs & von Horn, 1940; Hoffman & Sachs, 1953).

As equações básicas utilizada para a modelagem pretendida, são as equações de equilíbrio, de compatibilidade e as constitutivas, complementadas por uma função de escoamento que atende o critério de escoamento de *von Mises* (Sachs & von Horn, 1940; Prager & Hodge, 1951; Bridgman, 1952; Hoffman & Sachs, 1953; Juvinal, 1967; Dieter, 1976; Boreasi, Schmidt & Sidebottom, 1991).

As equações obtidas foram as seguintes (Silva, 1999).

1) Campo de Velocidades Cinematicamente Admissíveis:

$$V(r, \phi) = Cr^{-2} \exp \left[-2\sqrt{3} \int k(1-k^2)^{-1/2} d\phi \right] \quad (1)$$

onde C é uma constante de integração a ser determinada.

2) Campo de Taxa de Deformações:

$$\dot{\varepsilon}_{rr} = -2r^{-1}V(r, \phi) \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon}_{\phi\phi} = \dot{\varepsilon}_{\theta\theta} = r^{-1}V(r, \phi) \quad (3)$$

$$\dot{\gamma}_{r\phi} = -2\sqrt{3}k(1-k^2)^{1/2}r^{-1}v(r, \phi) \quad (4)$$

3) Campo de Tensões:

$$\frac{\sigma_{rr}}{\tau_{\max}} = -A \ln r + \sqrt{3(1-k^2)} - 3 \int k d\phi \quad (5)$$

$$\frac{\sigma_{\phi\phi}}{\tau_{\max}} = \frac{\sigma_{\theta\theta}}{\tau_{\max}} = -A \ln r - 3 \int k d\phi \quad (6)$$

$$\frac{\tau_{r\phi}}{\tau_{\max}} = k \quad (7)$$

onde k é uma função exclusiva da coordenada ϕ e A uma constante de separação.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A função k obedece a equação

$$\frac{dk}{d\phi} + k \cot g\phi + 2\sqrt{3}[1-k^2]^{1/2} = A \quad (8)$$

onde $\phi \in [0, \alpha]$ e $k \in [0, m]$

Sua solução é obtida com auxílio do método de *Runge-Kutta* de Quarta-Ordem (RK4), considerando-se matrizes cônicas com semi-ângulo de abertura ($\alpha = 4, 8, \dots, 24, 28$). A Figura 4 mostra os valores da função $k(\phi)$ para valores de $0 \leq m \leq 1$, sendo que, para cada conjunto de valores de $[\alpha, m]$, existe apenas um único valor para a constante A . A Figura 5.a e 5.b mostram a dependência de A com α e de A com m .

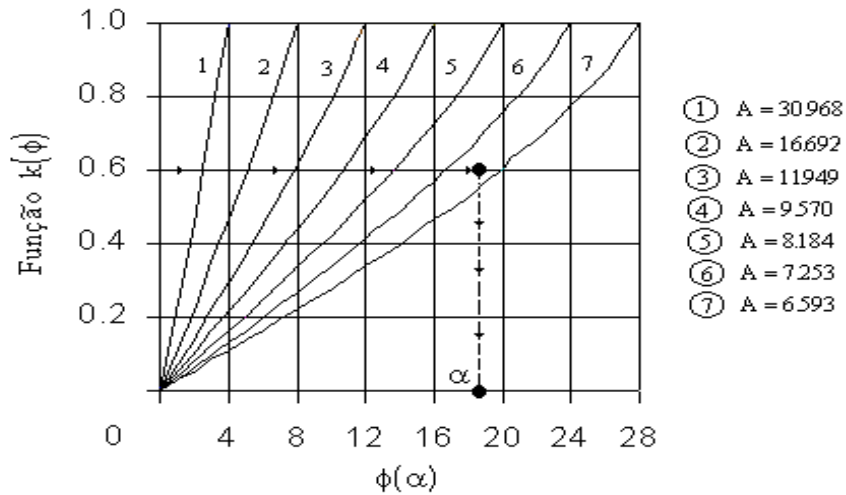


Figura 4. Representação gráfica da função $k(\phi)$ para vários valores de A , para $m = 1$.

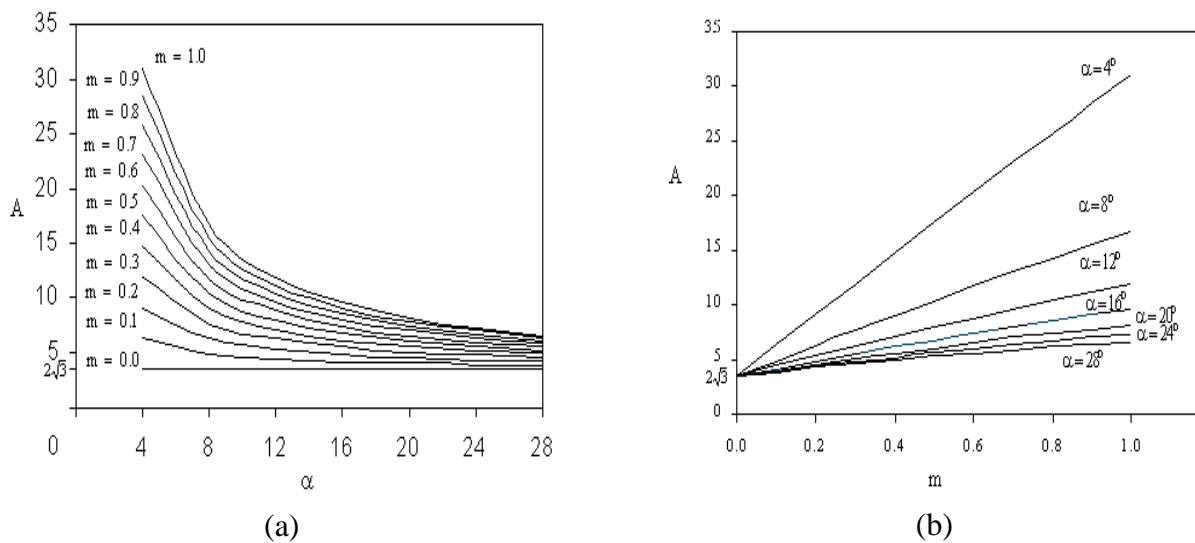


Figura 5. Variação de A com α e m respectivamente

O caso limite $m = 0$ corresponde a ausência completa de atrito na interface entre o material e a parede interna do cone, enquanto que $m = 1$ corresponde a uma parede interna extremamente rugosa.

Campo de Tensões

As características do campo de tensões são observadas na Figura 6.

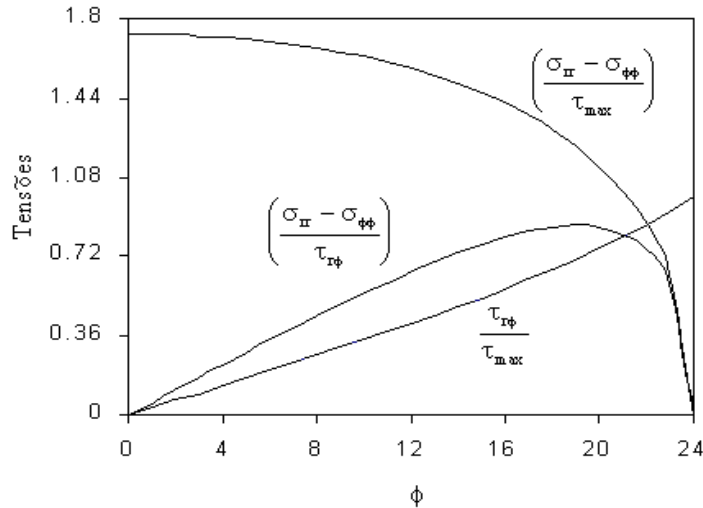


Figura 6. Variação das tensões $\sigma_{rr}, \sigma_{\phi\phi}$ e $\tau_{r\phi}$ em função de ϕ com $m = 1$ e $\alpha = 20^\circ$, na saída da zona de deformação

Neste caso, tendo-se os valores de A e k , obtém-se o campo de tensões para um determinado α . As propriedades que devem ser observadas para cada material são obtidas através dos valores de τ_{max} que depende do tipo de material a ser utilizado.

Campo de Velocidades

O campo de velocidades, obtido a partir das condições de contornos (Silva,1999) e de valores da função k , para cada plano de inspeção tomado na zona de deformação, como mostrado na Figura 7, tem a forma:

$$\frac{V(r,\phi)}{V_0} = - \left[\frac{D \cot g \alpha}{2(1-R)} \right]^2 r_v \sec \phi \tag{9}$$

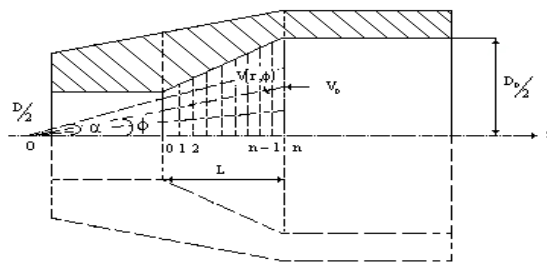
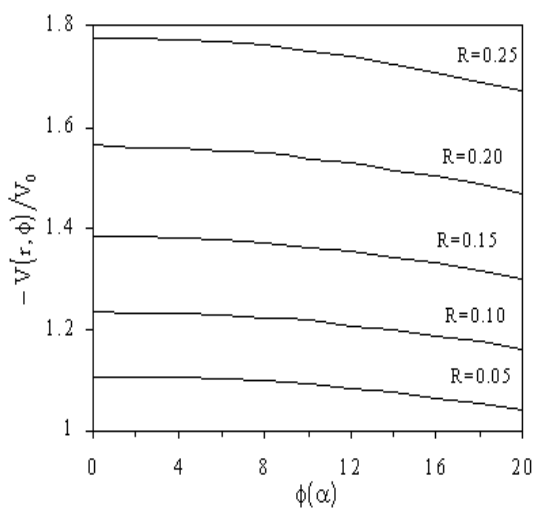
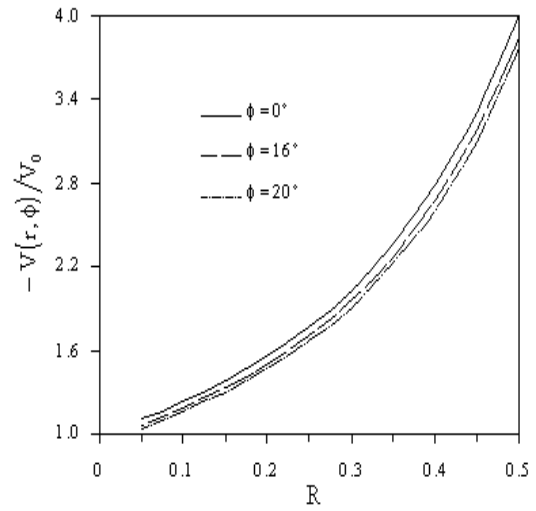


Figura 7. Representação gráfica do reticulado no mapeamento do campo de velocidades

Os perfis de velocidades são então obtidos e as Figuras 8.a e 8.b os representam em função de ϕ e das seções inicial e final da zona de deformação; para distintos valores de reduções R , onde $R = 1 - \frac{D}{D_0}$



(a)

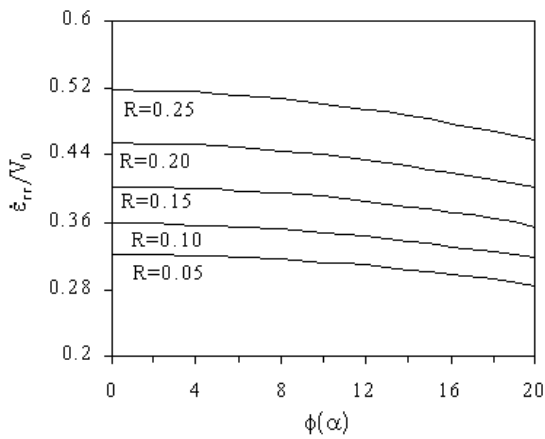


(b)

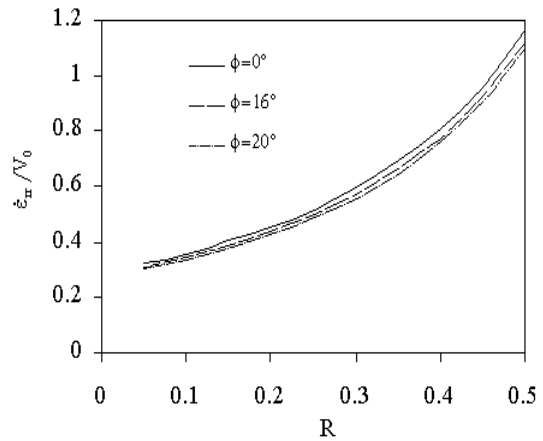
Figura 8. Perfis de velocidades na saída da zona de deformação: (a) em função de ϕ ; (b) em função da redução R

Campo de taxas de deformações

Quanto as características do campo de taxas de deformações radiais e circunferenciais, estas são similares ao do campo de velocidades; como podem ser vistas nas Figuras 9.a, 9.b, 10.a e 10.b e as Figuras 11.a e 11.b mostram o campo de taxas de deformações cisalhantes.



(a)



(b)

Figura 9. Campo de taxas de deformações radiais: (a) em função de ϕ ; (b) em função da redução R

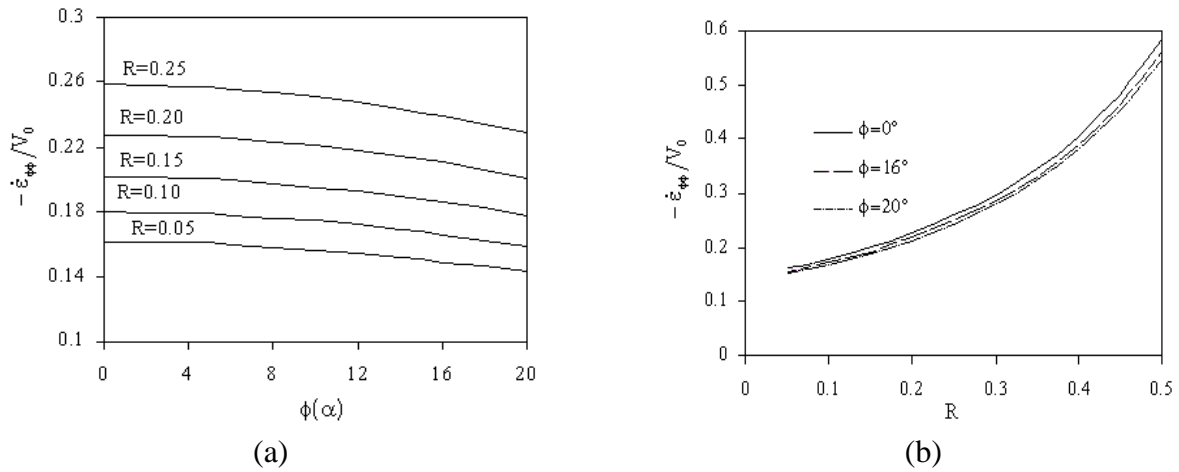


Figura 10. Campo de taxas de deformações circunferenciais: (a) em função de ϕ ; (b) em função da redução R

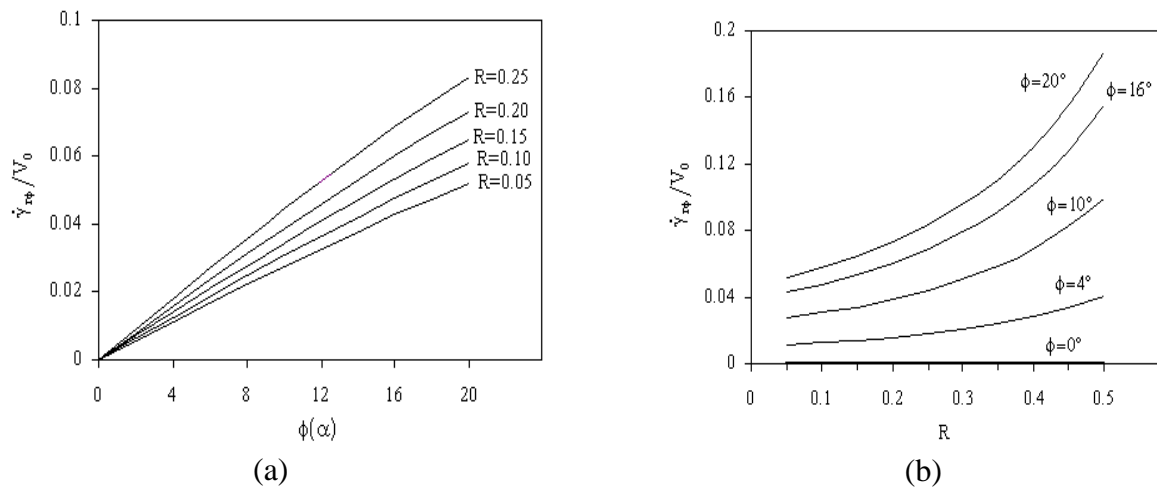


Figura 11. Campo de taxas de deformações cisalhantes: (a) em função de ϕ ; (b) em função da redução R

4. CONCLUSÕES

A análise dos resultados obtidos evidenciaram que (1) a constante de separação A tem seu valor condicionado ao par de valores (α, m) . Isto se deve, naturalmente, à necessidade de se atender não só a condição inicial $k(0) = 0$, mas também à condição limite $k(\alpha) = m$, representada pelo truncamento do fluxo dos cálculos computacionais no instante em que tal condição é atingida. A importância de A ser função α e de m , reside no fato de se poder simular todas as situações compreendidas desde o caso limite de ausência de atrito ($m = 0$), até o oposto ($m = 1$), que corresponde ao caso da parede interna ser extremamente rugosa. No caso de ausência completa de atrito verificou-se que quando $\phi(\alpha) = 0$ o valor da constante será $A = 2\sqrt{3}$, sendo este o mínimo valor que esta constante de separação poderá assumir, o qual é independente dos possíveis valores do semi-ângulo (α) de abertura do cone; (2) O

campo das velocidades cinematicamente admissíveis e o campo das velocidades de deformação têm comportamentos semelhantes aos descritos em literaturas especializadas, como é o caso de Talbert e Avitzur; (3) Quanto ao campo de tensões, verificou-se que, pelo menos qualitativamente, seu comportamento é semelhante aos do campo de velocidades de deformação, o que de certo modo era esperado, pois o material é um plástico ideal, homogêneo e isotrópico.

Conclui-se, em vista dos resultados obtidos, e respeitadas as hipóteses simplificadoras impostas ao problema estudado, que o modelo se presta para descrever as características do fluxo plástico de um material de *von Mises* através de matrizes cônicas convergentes.

5. REFERÊNCIAS

- Avitzur, B, 1979, “Metal Forming: Process and Analysis”, McGraw-hill, New York.
- Balai, P. A, Sundararajan, T. & Lal, G. K., 1991, “Viscoplastic Deformation Analysis and Extrusion Die Design by FEM”, Journal Applied Mechanics, 58, pp. 644-650.
- Boresi, A. P.; Schmidt, R. J. & Sidebottom, O. M., 1991, “Advanced Mechanics of Materials”, McGraw Hill Book Company, Inc. NY.
- Bridgman, P.W., 1952, “Studies in large Plastic Flow and Fracture”, McGraw Hill Book Company, Inc. NY.
- Dieter, G.E., 1976, “Mechanical Metallurgy”, McGraw Hill Book Company, Inc. NY.
- Delijaicov, S., 1978, “Análise de Extrusão de Barras Cilíndricas em Matriz Cônica pelo Método do Limite Superior”, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica.
- Hoffman, O. & Sachs, G., 1953, “Theory of Plastic”, McGraw Hill Book Company, Inc. NY.
- Juvinal, R.C., 1967, “Engineering Considerations of Stress, Strain and Strength”, McGraw Hill Book Company, Inc. NY.
- Kudo, H., 1960, “Some Analytical and Experimental Studies of Axy-Symmetric Cold Forging and Extrusion_I”, International Journal Mech. Science, vol. 2, pp. 102-127.
- Medrano, R. E; Gillis, P.P.; Hinesley, C. & Conrad, H., 1971, “Application of Visioplasty Techniques to Axisymmetric Extrusion”, Metal Forming, pp. 85-107
- Medrano, R. E. & Gillis, P. P., 1972, “Visioplasty Techniques in Axisymmetric Extrusion”, Journal of Strain Analysis, vol. 7, pp. 170-176.
- Prager, E. P. & Hodger Jr., P. G., 1951, “Theory of Perfectly Plastic Solids”, John Wiley & Sons, Inc. Ny.
- Sachs, G. & von Horn, H. R., 1940, “Practical Metallurgy”, American Society for metals, Cleveland, USA.
- Shabaik, A. N., 1991, “Mechanics of Plastic Deformation in Metal Forming Processes: Experimental and Numerical Methods”, Journal of Mat. Processing Tech., 27, pp. 3-24.
- Silva, J.A.C., 1999, “Estudo das Características do Fluxo Plástico através de Matrizes Cônicas Convergentes”, TM – 05/99, UFPA/CT/CMEM.
- Stahlberg, U. & Hou, J., 1995, “A UBET- Simulation Meant for Basic Understanding of the Extrusion of Aluminum Profiles”, J. of Eng. For Ind., Trans. Of the ASME, pp.485-493.
- Talbert, S. H. & Avitzur, B., 1996, “Elementary Mechanics of Plastic Flow in metal Forming”, John Wiley & Sons Inc.