



ANÁLISE DO PROCESSO DE EXTRUSÃO EM CANAL ANGULAR (120°) PELO MÉTODO DE LIMITE SUPERIOR

Jailson da Silva¹, Pablo A. Santos¹, Ricardo K. Unfer¹, Guilherme O. Verran¹, Athos H. Plaine^{1*}

¹Universidade do Estado de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Joinville, SC, Brasil.

*e-mail: athos.plaine@udesc.br

RESUMO

A obtenção de cálculos exatos das distribuições de tensão e deformação com base em equações de controle para um processo de conformação, principalmente envolvendo grande deformação, são muitas vezes difíceis. Com isso, alguns métodos analíticos envolvendo hipóteses simplificadoras em relação às propriedades do material e modos de deformação, como o limite superior e as linhas de escorregamento, têm sido desenvolvidos para vários processos de conformação. Neste trabalho, foi proposto um modelo analítico, baseado na teoria do limite superior, para prever o fluxo de material e as cargas máximas de processo para uma matriz de Extrusão em Canal Angular (ECAP), com seção transversal circular e um ângulo de canal de 120° de interseção. Com base no modelo, a potência dissipada em todas as superfícies de descontinuidade por atrito e velocidade foi determinada e utilizada para prever a força máxima do processo em função da geometria do canal e do comportamento plástico do material. Para validar o modelo desenvolvido, uma matriz ECAP foi produzida e utilizada para determinar curvas experimentais de carga-deslocamento de amostras da liga de alumínio AA6061-T6 com diferentes comprimentos. A partir dos resultados, foi observada uma boa correlação entre os resultados teóricos e experimentais.

Palavras-chave: *deformação plástica severa; extrusão em canal angular; método de limite superior; fator de atrito.*

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a produção de materiais ultra-finos (UFG) e nanoestruturados tem se intensificado através da aplicação de métodos de deformação plástica severa (SPD), atraindo um grande interesse no campo da ciência e engenharia de materiais. O método mais popular de SPD é a Prensagem/Extrusão de Canal Angular (ECAP/ECAE), sendo capaz de produzir deformações plásticas severas e relativamente uniformes em uma variedade de materiais, sem causar alterações substanciais na forma geométrica ou na seção transversal. Para ligas biomédicas, o ECAP também provou ser eficiente na melhoria da biocompatibilidade, adesão e proliferação celular; além de apresentar uma melhor combinação entre resistência mecânica e ductilidade em comparação com outros processos de conformação convencionais.

Durante o processamento ECAP, uma amostra com seção transversal quadrada ou circular é extrudada em uma matriz com dois canais de interseção de seção transversal igual. Como a amostra é pressionada usando um punção, todo o material que passa pela seção de interseção sofre deformação por cisalhamento. Como a seção transversal é simétrica, a amostra pode ser rotacionada antes de ser recolocada na matriz para execução de mais passes. As

variáveis críticas do processo ECAP incluem o ângulo da matriz, temperatura, número de passes através da matriz e a forma que a amostra é ou não rotacionada entre as passagens.

O método do limite superior é uma alternativa analítica aproximada aos métodos completos, pois permite obter valores de potência iguais ou superiores à potência real dos processos tecnológicos. Tal método baseia-se num campo generalizado de velocidades cinematicamente admissível, ou seja, que represente o fluxo que o material faz durante o processamento. Isto pode ser difícil sob certas circunstâncias, especialmente para padrões de fluxo complexos, influenciados por fatores tais como propriedades do material, condição de contorno e efeitos de temperatura. Em 2008, Paydar et al. realizaram, pela primeira vez, uma abordagem de limite superior para analisar um conjunto de matrizes ECAP com uma seção transversal circular e um ângulo de 90° do canal de interseção, mostrando uma boa concordância entre a curva de deslocamento de carga teórica e experimental. Medeiros et al. incluíram os efeitos da taxa de deformação do material e dois critérios de plasticidade isotrópica no modelo, mostrando que os parâmetros ECAP que mais afetam a pressão de extrusão são o fator de atrito, o ângulo dos canais da matriz de interseção, o raio externo do canal e o raio interno do filete. Desde então, poucos estudos foram publicados sobre este assunto, sendo a maioria deles limitados a matrizes ECAP de 90° .

Neste trabalho, baseado na teoria do limite superior, foi desenvolvido um modelo analítico para uma matriz ECAP com seção transversal circular e um ângulo de canal de 120° de interseção. Além disso, foi investigado o efeito do comprimento do espécime e do fator de atrito na pressão máxima de extrusão. A fim de validar os resultados, a matriz ECAP foi produzida e utilizada para determinar curvas experimentais de carga-deslocamento.

MATERIAIS E MÉTODOS

Foram obtidas curvas de carga-deslocamento para barras de liga de alumínio AA6061-T6 deformadas por uma única passagem ECAP para validar o modelo analítico. As amostras foram produzidas na forma de uma haste com diâmetro de 8 mm e diferentes comprimentos: 10, 20 e 30 mm. O processamento ECAP foi realizado à temperatura ambiente em uma matriz com ângulos de canal de $\Phi = 120^\circ$ e $\psi = 30^\circ$, com uma velocidade de extrusão de 5 mm/min. A Tabela 1 lista as propriedades mecânicas da liga AA6061-T6. A imagem do matriz é mostrada na Figura 1. Foi utilizado bissulfeto de molibdênio como lubrificante a fim de reduzir o atrito entre a superfície da amostra e a parede da matriz.

Tabela 1. Propriedades mecânicas da liga de alumínio AA6061-T6 na condição recebida.

Ligas	Força de rendimento	Resistência à tração	Alongamento	Dureza
AA6061-T6	300 (MPa)	330 (MPa)	15 (%)	95 (HB)

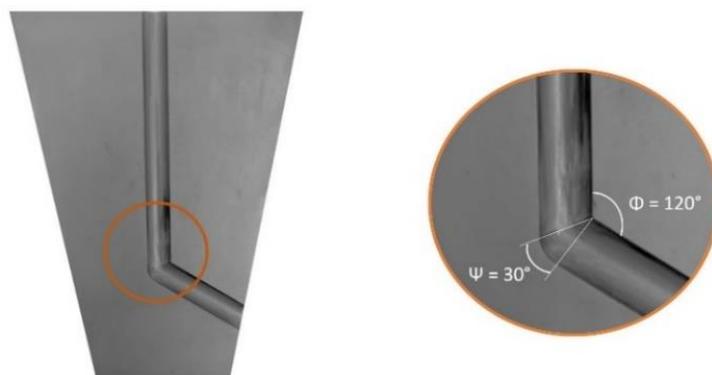


Figura 1. Representação da matriz ECAP bipartida com ângulos de canal de $\Phi = 120^\circ$ e $\psi = 30^\circ$.

Ensaio de tração foram realizados para obtenção da curva de tensão x deformação da liga AA6061-T6, para determinar a equação do seu comportamento plástico. A partir da curva, uma tensão média de fluxo (488 MPa), foi estimada para um único passe na ECAP, integrando a Equação (A) entre zero e a deformação equivalente final ($\epsilon_{eq} = 0,67$), a qual foi obtida a partir equação de von Mises, Equação (B).

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\epsilon_{eq}} \int_0^{\epsilon_{eq}} K \epsilon^n d\epsilon \quad (A)$$

$$\epsilon_{eq} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left[2 \cot\left(\frac{\phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) + \Psi \left(\operatorname{cosec} \frac{\phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) \right] \quad (B)$$

Foi utilizado o método “Teste de Compressão de Barril” para determinar o fator de atrito “m”. Todos os ensaios foram realizados em triplicata à temperatura ambiente e utilizando os mesmos lubrificantes no processamento por ECAP.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O teorema do limite superior foi desenvolvido de acordo com o teorema proposto por Prager e Hodger, que afirma que o campo de velocidade cinemático admissível que minimiza a energia consumida durante um processo é expresso pela Equação (C).

$$P = \int_V \bar{\sigma} \dot{\epsilon} dv + \int_{S_s} \tau \dot{u}_1 ds + \int_{S_c} T \dot{u}_1 ds \quad (C)$$

O primeiro termo na equação refere-se à potência dissipada devido à deformação homogênea interna ao longo do volume deformado V. O segundo termo expressa a potência dissipada devido às superfícies de descontinuidade de velocidade, enquanto o terceiro termo considera as perdas por atrito sobre as interfaces matriz/material. Neste trabalho, o procedimento adotado para desenvolver uma solução para o ECAP proposto foi dividir o canal em três zonas, ao longo de cada uma das quais a velocidade é contínua, como mostrado na Figura 2 (a).

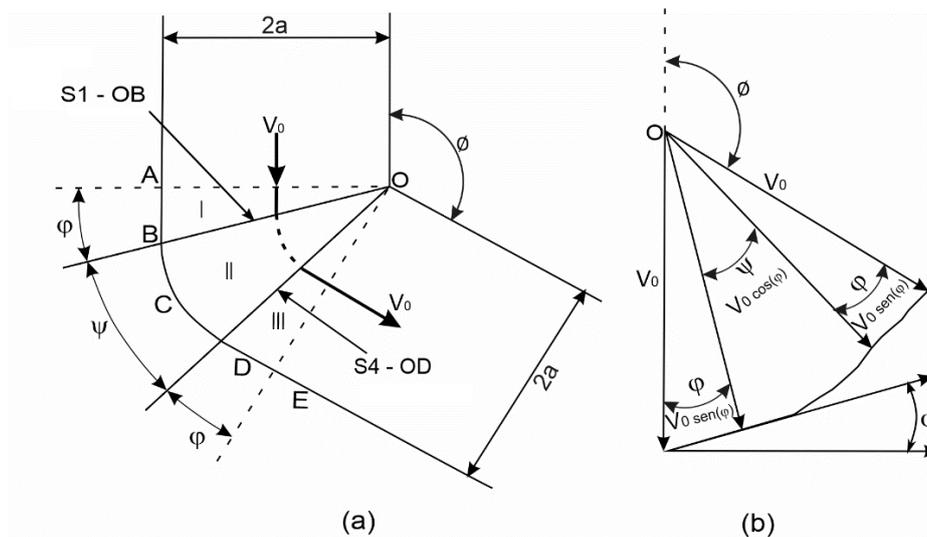


Figura 2. (a) Modelo de deformação bidimensional utilizado na análise pelo método do limite superior do processo ECAP e (b) seu hodógrafo.

Após o equacionamento e desenvolvimento matemático, a força máxima de extrusão para o processo ECAP com seção transversal circular e um ângulo de interseção de 120° é dada como sendo:

$$F_{max} = \pi a^2 k \left\{ \left(\frac{\pi}{3} - 2\phi \right) + (2 \tan \phi) + (4m \tan \phi) + \left(\frac{2m}{\pi} \right) \left(\frac{\pi}{3} - 2\phi \right) \left(\frac{\tan^2 \phi}{2} + 1 \right) \cos \phi + \left(2m \frac{l}{a} \right) \right\} \quad (D)$$

A comparação entre as forças teóricas ECAP e as curvas experimentais de carga-deslocamento para os diferentes comprimentos de barras processadas é apresentada na Figura 3. Estes resultados demonstram uma excelente concordância do modelo teórico com os experimentos, tendo um desvio máximo de apenas 6%. Este desvio está principalmente relacionado com as suposições simplificadoras feitas no desenvolvimento do modelo. Como pode-se observar, o comprimento da barra e a força ECAP apresentam uma relação de proporcionalidade direta, visto que com o aumento do tamanho da barra haverá uma maior área de contato com o matriz ECAP, o que causa maior energia para superar o atrito estático.

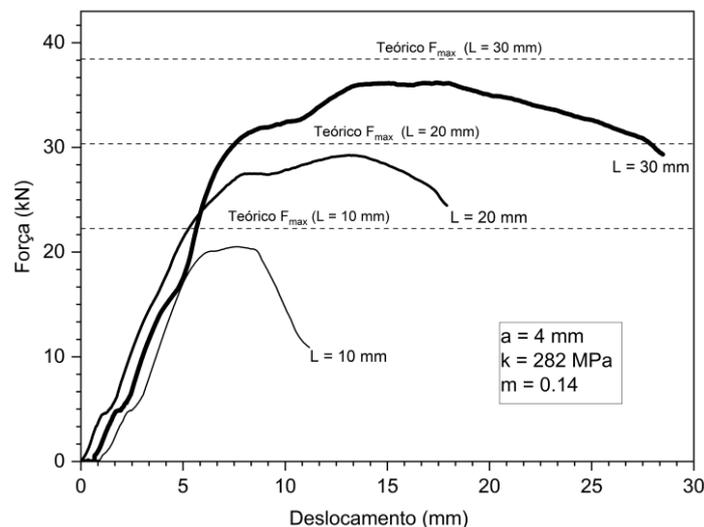


Figura 3. Curvas experimentais de carga-deslocamento ECAP à temperatura ambiente para diferentes comprimentos de barras: 10, 20 e 30 mm.

A partir destas curvas também é possível identificar a presença de três estágios de condição de atrito. A primeira etapa é a compressão direta da barra e apresenta uma forma linear, que está relacionada apenas com o atrito estático. A segunda etapa é caracterizada por uma transição entre as regiões de atrito estático e dinâmico. O terceiro estágio representa apenas o atrito dinâmico e, portanto, há uma redução da força de extrusão. Logo após atingir a força máxima, as curvas diminuem gradualmente à medida que a área de superfície de atrito no canal de entrada diminui com o avanço do punção. Esta forma de curva é característica dos processos de extrusão e semelhante aos apresentados em trabalhos anteriores envolvendo ECAP.

A Figura 4 compara as forças teóricas de extrusão para barras com diferentes diâmetros e um comprimento fixo de 30 mm, determinadas pela equação desenvolvida neste estudo com valores obtidos a partir do modelo de limite superior desenvolvido por Paydar et al. para uma matriz ECAP de 90° , considerando as propriedades da liga Al6061-T6 apresentadas anteriormente. Como esperado, a redução do ângulo de interseção aumenta a magnitude da deformação plástica e aumenta o fenômeno de encruamento, resultando em maiores valores de força.

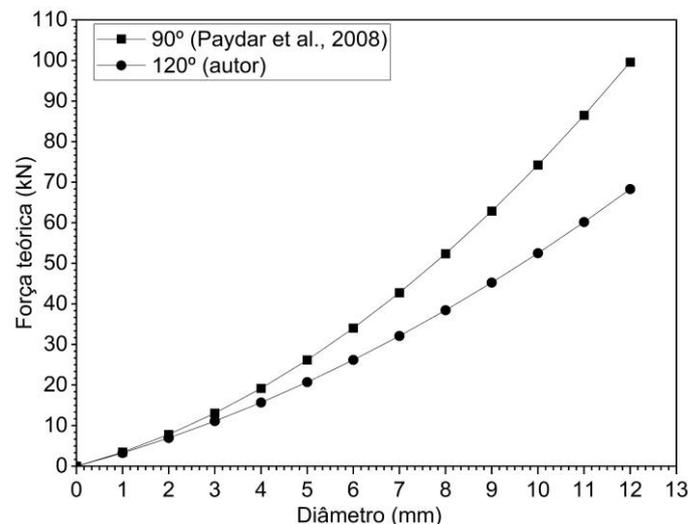


Figura 4. Variação das forças teóricas máximas para uma barra da liga Al6061-T6 (de comprimento fixo de 30 mm) em função do diâmetro da seção transversal, para matrizes ECAP com ângulos de interseção de 90° e 120°.

CONCLUSÕES

Um modelo analítico para estimativa da força máxima de extrusão, a partir do método do limite superior, foi desenvolvida com sucesso neste estudo para uma matriz ECAP com seção transversal circular e um ângulo de canal de 120° de interseção, apresentando boa correlação com os resultados experimentais. Dessa forma, tal modelo torna-se uma ferramenta útil para auxiliar no dimensionamento correto da ferramenta e na determinação as variáveis de processo para diferentes materiais processados na matriz ECAP estudada. A correta escolha e utilização de lubrificantes, em particular, demonstrou ser essencial para reduzir de forma substancial a força máxima de processamento. Um alto fator de atrito nas interfaces do material/matriz pode tornar a operação impraticável devido às tensões excessivas aplicadas no punção.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES [88882.447328/2019-01] e pela Fundação de Apoio à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina - FAPESC [2021TR001901].

REFERÊNCIAS

- Artigos de periódicos:** ALIHA, M. R. M.; SHAHHEIDARI, M.; BISADI, M.; AKBARI, M.; HOSSAIN, S. Mechanical and metallurgical properties of dissimilar AA6061-T6 and AA7277-T6 joint made by FSW technique. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S. l.], v. 86, n. 9–12, p. 2551–2565, 2016. DOI: 10.1007/s00170-016-8341-x.
- Artigos de periódicos:** EBRAHIMI, R.; NAJAFIZADEH, A. A new method for evaluation of friction in bulk metal forming. **Journal of Materials Processing Technology**, [S. l.], v. 152, n. 2, p. 136–143, 2004. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.03.029.
- Artigos de periódicos:** HARSHA, R. N.; MITHUN KULKARNI, V.; SATISH BABU, B. Severe Plastic Deformation - A Review. **Materials Today: Proceedings**, [S. l.], v. 5, n. 10, p. 22340–22349, 2018. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.06.600.
- Artigos de periódicos:** IWAHASHI, Yoshunori; WANG, Jingtao; HORITA, Zenji; NEMOTO, Minoru; LANGDON, Terence G. PRINCIPLE OF EQUAL-CHANNEL ANGULAR PEESING FOR THE PROCESSING OF ULTRA-FINE GRAINED MATERIALS. **Arthritis Care and Research**, [S. l.], v. 55, n. 2, p. 322–324, 1995. DOI: 10.1002/art.21843.

5. **Artigos de periódicos:** KIM, Taik Nam; BALAKRISHNAN, A.; LEE, B. C.; KIM, W. S.; SMETANA, K.; PARK, J. K.; PANIGRAHI, B. B. In vitro biocompatibility of equal channel angular processed (ECAP) titanium. **Biomedical Materials**, [S. l.], v. 2, n. 3, p. 2–6, 2007. DOI: 10.1088/1748-6041/2/3/S06.
6. **Artigos de periódicos:** LIANG, Wei; BIAN, Liping; XIE, Guoyin; ZHANG, Wenli; WANG, Hongxia; WANG, Shunqi. Transformation matrix analysis on the shear characteristics in multi-pass ECAP processing and predictive design of new ECAP routes. **Materials Science and Engineering A**, [S. l.], v. 527, n. 21–22, p. 5557–5564, 2010. DOI: 10.1016/j.msea.2010.05.058.
7. **Artigos de periódicos:** MEDEIROS, N.; MOREIRA, L. P. Upper-bound analysis of die corner gap formation for strain-hardening materials in ECAP process. **Computational Materials Science**, [S. l.], v. 91, p. 350–358, 2014. DOI: 10.1016/j.commatsci.2014.05.012.
8. **Artigos de periódicos:** MEDEIROS, N.; MOREIRA, L. P.; BRESSAN, J. D.; LINS, J. F. C.; GOUVÊA, J. P. Upper-bound sensitivity analysis of the ECAE process. **Materials Science and Engineering: A**, [S. l.], v. 527, n. 12, p. 2831–2844, 2010. DOI: 10.1016/j.msea.2009.12.049.
9. **Artigos de periódicos:** PAYDAR, M. H.; REIHANIAN, M.; EBRAHIMI, R.; DEAN, T. A.; MOSHKARSAR, M. M. An upper-bound approach for equal channel angular extrusion with circular cross-section. **Journal of Materials Processing Technology**, [S. l.], v. 198, n. 1–3, p. 48–53, 2008. a. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.06.051.
10. **Artigos de periódicos:** RADHI, Hussein Naser; ALJASSANI, Alaa M. H.; MOHAMMED, Mohsin Talib. Effect of ECAP on microstructure, mechanical and tribological properties of aluminum and brass alloys: A review. **Materials Today: Proceedings**, [S. l.], v. 26, p. 2302–2307, 2019. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.02.497.
11. **Artigos de periódicos:** SADASIVAN, N.; BALASUBRAMANIAN, M.; RAMESHBAPU, B. R. A comprehensive review on equal channel angular pressing of bulk metal and sheet metal process methodology and its varied applications. **Journal of Manufacturing Processes**, [S. l.], v. 59, p. 698–726, 2020. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.10.032.
12. **Artigos de periódicos:** SEGAL, V. M. Engineering and commercialization of equal channel angular extrusion (ECAE). **Materials Science and Engineering: A**, [S. l.], v. 386, n. 1–2, p. 269–276, 2004. DOI: 10.1016/j.msea.2004.07.023.
13. **Artigos de periódicos:** VALIEV, Ruslan Z.; LANGDON, Terence G. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement. **Progress in Materials Science**, [S. l.], v. 51, n. 7, p. 881–981, 2006. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2006.02.003.

UPPER-BOUND ANALYSIS FOR EQUAL CHANNEL ANGULAR PRESSING (ECAP) WITH AN INTERSECTING CHANNEL ANGLE OF 120°

ABSTRACT

The exact calculations of the stress and strain distributions based on the controlling equations for a forming process with large deformation are often difficult. To circumvent such difficulties, some analytical methods such upper-bound analysis and slip-line field theory have been established by making a number of simplifying assumptions regarding the material properties and deformation modes. In this work an analytical model based on the upper-bound theory was successfully developed to predict material flow pattern and maximum process loads for an Equal Channel Angular Pressing (ECAP) die with circular cross-section and an intersecting channel angle of 120°. Based on the model, the power dissipated on all frictional and velocity discontinuity surfaces were determined and optimized in order predict the maximum process force as function of the channel geometry and the material plastic behavior. To validate the developed model, the ECAP die were produced and used to determine experimental load-displacement curves of AA6061-T6 specimens with different lengths. A good correlation between theoretical and experimental results was observed. In addition, the constant friction factor demonstrated to have a strong effect on the relative extrusion pressure.

Keywords: severe plastic deformation; equal channel angular pressing; upper-bound analysis; constant friction factor.