

DESENVOLVIMENTO POR SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E ANÁLISE DO DESEMPENHO REAL DE UMA MATRIZ PARA EXTRUSÃO EM CANAL ANGULAR

Phillip Springer ¹
José Benaque Rubert ²
Vitor Luiz Sordi ³
Maurizio Ferrante ⁴

Resumo

Os parâmetros geométricos críticos de uma matriz de Extrusão em Canal Angular (ECA) foram otimizados empregando o software Deform[®]. Em base ao resultados da simulação foi construída uma matriz ECA, dedicada ao processamento de placas de Al AA1050 com 7 mm de espessura. Do software foram obtidas as forças de prensagem e a distribuição da deformação equivalente na placa, após um e quatro passes. Essas forças simuladas foram comparadas com as reais, obtidas das curvas força *versus* deslocamento do punção, enquanto a distribuição da deformação equivalente foi validada por medidas de indentação Vickers. Ensaios de tração e a observação microestrutural das placas processadas mostram que o desempenho da matriz é amplamente satisfatório.

Palavras-chave: Método de elementos finitos; Extrusão angular em canais; Deformação.

DEVELOPMENT BY COMPUTATIONAL SIMULATION AND PERFORMANCE ANALYSIS OF AN EQUAL CHANNEL ANGULAR PRESSING DIE

Abstract

Critical geometric parameters of an Equal Channel Angular Pressing (ECAP) die suitable to plate processing were optimized by making use of the DEFORM[™] software. Following the simulation a die was manufactured and employed in the processing of 7 mm thick Al AA 1050 plates. Software output included the pressing forces and the equivalent deformation distribution within the plates, after one and four ECAP passes. Calculated pressing forces against the punch displacement were compared with the actual forces, whilst the deformation distribution is validated by Vickers microhardness measurements. From tensile tests and microstructural observation of the processed plates the die performance was found quite satisfactory.

Key words: Finite elements method; Equal channel angular pressing die; Deformation.

I INTRODUÇÃO

Materiais microestrutura ultrafina, especificamente com tamanhos de grão entre 250 nm e 500 nm, exibem propriedades de grande interesse podendo ser obtidos por diversas tecnologias. Dentre estas se destaca o processo ECA, que permite a produção de materiais metálicos submicrocristalinos e com dimensões de interesse comercial.⁽¹⁾ Nessa tecnologia são inseridos tarugos com seção transversal quadrada ou circular em um canal formado por dois segmentos que fazem ângulo entre si, a deformação

ocorrendo por cisalhamento simples. No projeto da matriz são críticos o ângulo entre os segmentos dos canais (Φ) e o ângulo de curvatura que denota o arco que faz a concordância dos mesmos (ψ) (Figura 1a). A maioria das investigações é realizada com $\Phi = 90^\circ$ ou 120° , enquanto ψ tem uma variabilidade mais ampla. Os referidos ângulos determinam a severidade da deformação cisalhante, e a deformação equivalente (ϵ_{eq}) por passe é dada pela equação de Iwahashi:⁽²⁾

¹Físico, Mestrando do Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, Rod. Washington Luis, km 235, Cep 13565-905, São Carlos, SP, Brasil. E-mail: phillipspringer_sp@hotmail.com

²Engenheiro Civil, Dr. Professor, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, Rod. Washington Luis, km 235, Cep 13565-905, São Carlos, SP, Brasil. E-mail: benaquer@ufscar.br

³Engenheiro mecânico, Dr. Professor, Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, Rod. Washington Luis, km 235, Cep 13565-905, São Carlos, SP, Brasil. E-mail: sordi@ufscar.br

⁴Engenheiro metalurgista, PhD, Professor, Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, Rod. Washington Luis, km 235, Cep 13565-905, São Carlos, SP, Brasil. E-mail: ferrante@ufscar.br

$$\varepsilon_{eq} = \frac{l}{\sqrt{3}} \left[2 \cotg \left(\frac{\varphi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) + \Psi \operatorname{cosec} \left(\frac{\varphi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) \right] \quad (1)$$

Além das variáveis associadas à geometria da matriz o processo conta com a possibilidade de alterar o caminho da deformação pela rotação da amostra entre cada passe.

O efeito mais importante do processo ECA é o grande aumento da resistência mecânica do material, consequência da acentuada redução do tamanho de grão. Observa-se também que a deformação por cisalhamento causa alterações na textura, que melhoram a conformabilidade de placas.^(3,4) Portanto em estudos desse tipo surge a necessidade de estender o processo de deformação ECA a seções retangulares. Há, porém, escassas referências sobre esse processo aplicado a chapas,⁽⁵⁻⁷⁾ e pouco conhecimento sobre a distribuição da deformação equivalente em produtos nessa geometria.

Este trabalho apresenta a metodologia de desenvolvimento de uma matriz ECA dedicada ao processamento de chapas. Abordam-se o aspecto estrutural da matriz e a influência de suas características geométricas nas propriedades do produto. Forças e deformações foram modeladas utilizando a técnica dos Elementos Finitos (EF) e os resultados foram validados experimentalmente pelo registro

das forças de prensagem e por medidas de microdureza realizadas sobre amostras em forma de placa, processadas em uma matriz ECA. O desempenho da matriz foi avaliado por ensaios de tração e pela observação microestrutural do material processado.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Utilizando o software de EF Deform™, adequado a grandes deformações e dotado de recursos de refinamento automático da malha, foram calculadas as forças de prensagem e simulado o processamento ECA de placas de Al AA1050. Utilizou-se uma malha 3D com elementos tetraédricos e coeficiente de atrito igual a 0,12, valor adequado ao par alumínio/aço com lubrificação. A matriz foi considerada como corpo rígido e o deslocamento do punção da matriz, de seção idêntica à da amostra, decorre como mostrado na Figura 1b, onde F representa a ação da prensa. Com isso foi calculada a distribuição da deformação equivalente no volume das chapas após um e após quatro passes ECA. Foi dada especial atenção ao ângulo Ψ , que forma a concordância dos canais em seu ponto de encontro e que, como mostra a Figura 1a, depende dos raios de curvatura externo (R) e interno (r).

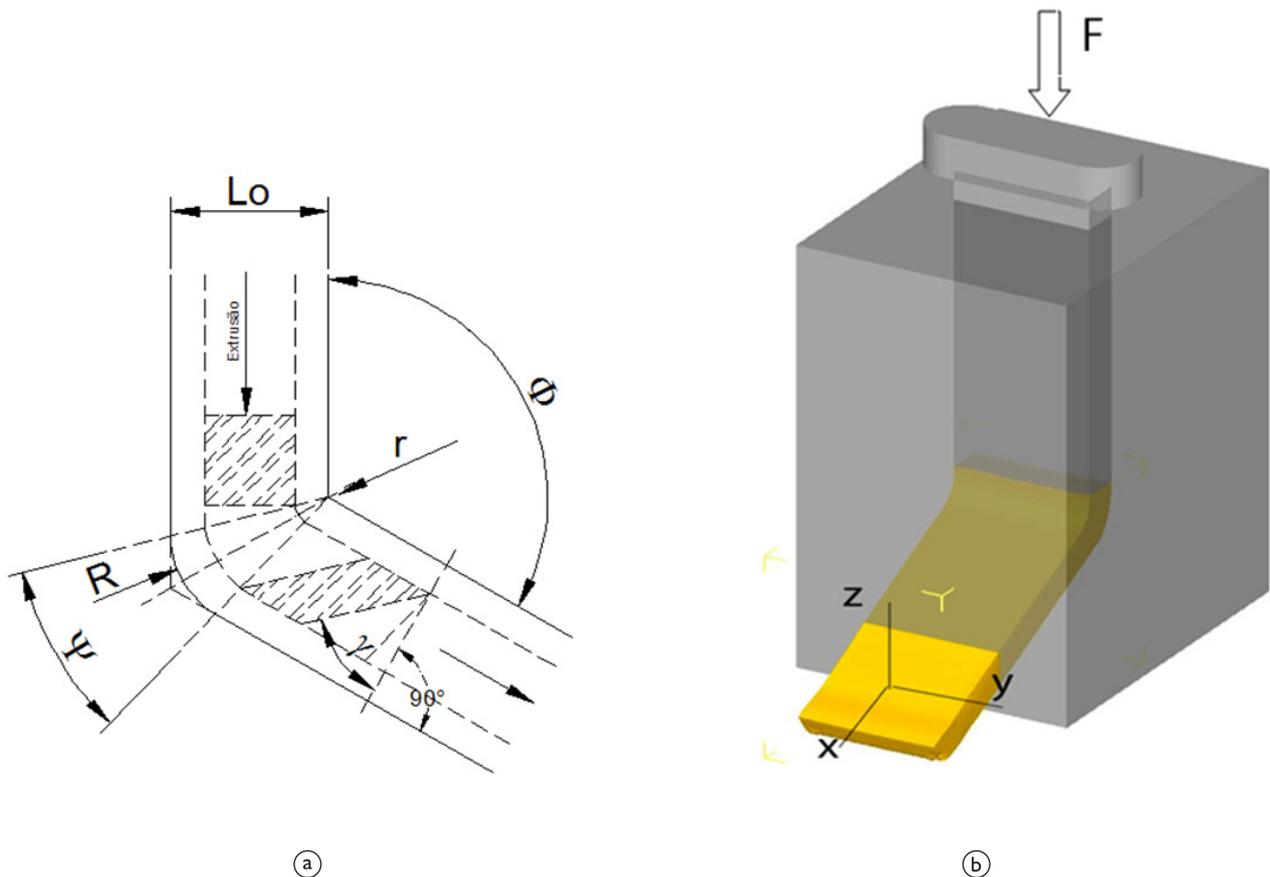


Figura 1. Matriz ECA: (a) variáveis geométricas dos canais e esquematização da deformação cisalhante da amostra; e (b) esquema da matriz projetada para o processamento de placas.

No presente trabalho, com base em experiência anterior em processamento ECA de tarugos de seção quadrada e circular, foi simulada e testada experimentalmente a configuração $R = 3$ e $r = 0$ mm.

Foi construída uma matriz em aço AISI H13, temperado e revenido, com a forma geral esquematizada na Figura 1b, onde estão definidos os eixos de referência x-y-z. Os ângulos de curvatura R - r são idênticos aos utilizados na simulação. O material de trabalho é constituído por placas de Al AA1050 com 7 mm de espessura, das quais foram extraídas amostras com $7 \times 25 \times 70$ mm³, processadas por um a quatro passes ECA em uma máquina Kratos de tração-compressão. As cargas de prensagem foram registradas em função do avanço do punção. A homogeneidade da deformação foi avaliada por medidas de microdureza Vickers tomadas numa seção perpendicular à direção x, na região central da amostra e a meio comprimento desta. Sobre esse plano foram feitas impressões espaçadas de 0,5 mm, utilizando carga de 300 gf aplicada por 15 s. Com o auxílio do software Sigmaplot™, as 637 medidas resultantes foram apresentadas na forma de mapas, em escalas de cores proporcionais à dureza em cada ponto da superfície.

Foram realizados ensaios de tração até a fratura empregando uma máquina Instron 5500 em corpos de prova miniaturizados, com geometria proporcional à definida pela Norma ASTM E8⁽⁸⁾ (seção transversal igual a 6×6 mm², comprimento útil igual a 11 mm e taxa de deformação inicial de $1,5 \times 10^{-3}$ s⁻¹). Os corpos de prova foram usinados com o eixo de tração paralelo à direção x, a partir do material nas condições como recebido e processado por até quatro passes ECA. Foram realizadas observações pela técnica de microscopia eletrônica de transmissão (MET) em um equipamento Phillips CMI20 utilizando como eletrólito uma solução de metanol e ácido nítrico na proporção 7:3. Na identificação das amostras foi empregado um numeral indicando o número de passes, seguido pela letra X.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na simulação de cada passe é necessário conhecer a curva tensão - deformação da condição anterior; portanto, a curva da amostra 0X para o 1º passe, da amostra 1X para o 2º passe, etc. A Figura 2a apresenta o trecho inicial, correspondente à região de deformação uniforme, das curvas tensão deformação para um, dois, três e quatro passes. Na Figura 2b a curva experimental da amostra 4X é comparada com a descrita pelo correspondente ajuste via modelo de Voce,⁽⁹⁾ utilizado nas simulações; há excelente concordância entre as curvas experimentais e o modelo, com índices de correlação entre 96% e 99,7%.

Os aspectos mais críticos do projeto e construção de uma matriz ECA são a correta escolha dos parâmetros geométricos Φ e ψ e o acabamento dos canais. Sob o aspecto estrutural é igualmente importante o cálculo da carga de flambagem do punção, que vai determinar a carga máxima aplicável pela prensa. Deve-se enfatizar que essa informação é crítica no processamento de placas finas, portanto com baixo momento de inércia do punção na direção Z. A esse respeito, a Figura 3 relaciona as forças de flambagem, calculadas pela equação de Euler, com a seção transversal do punção, considerando vários comprimentos do mesmo. Observa-se que, para amostras de Al AA1050 processadas em canais com seção igual à utilizada no presente trabalho (7×25 mm²), no 1º passe a máxima força sobre o punção, calculada pela simulação computacional do processo ECA, é de aproximadamente 2.000 kgf e, no 4º passe, é apenas ligeiramente maior. A relação dessas cargas com a carga de flambagem do punção é uma informação essencial para a segurança do processo. Deve-se notar que a condição mais desfavorável é o início da prensagem, quando a razão de aspecto do punção é máxima. Foi calculado que, para o punção aqui utilizado, que possui comprimento de 70 mm e seção transversal de 175 mm², a carga de flambagem inicial (máxima) é da ordem de 8.000 kgf (Figura 3), o que implica que materiais com resistência mecânica muito superior à do alumínio de pureza comercial possam ser processados com segurança nesta configuração geométrica.

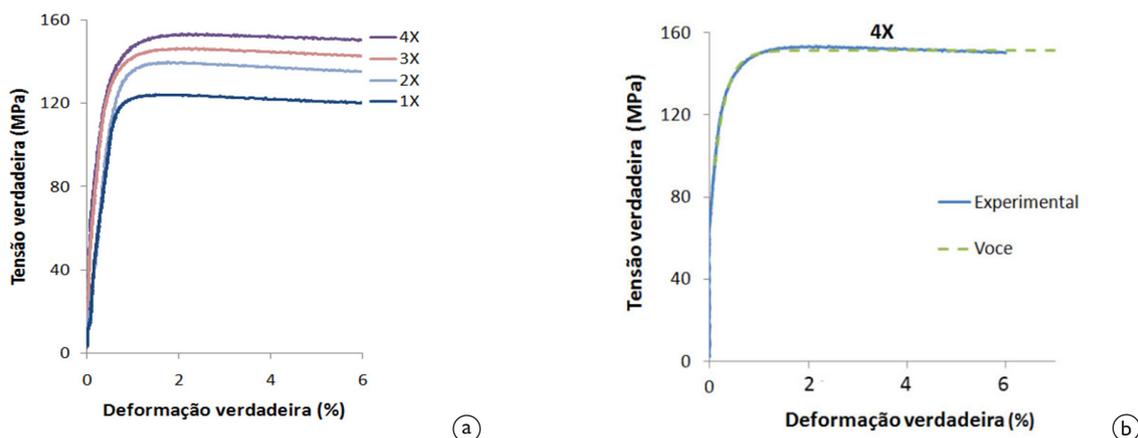


Figura 2. Parte inicial das curvas tensão-deformação em ensaios de tração (a) e exemplo de ajuste ao modelo de Voce⁽⁸⁾ utilizando o software de programação MATLAB™ (b).

A Figura 4 compara as forças necessárias para a deformação ECA, calculadas pela simulação numérica, com as forças reais registradas pela célula de carga da prensa para um e quatro passes. Observa-se que a geometria do

canal manteve as cargas muito abaixo da de flambagem, indicada na Figura 3, mesmo durante o quarto passe. A simulação e o experimento são bastante próximos no que toca à força média de prensagem.

Desvios e inflexões das curvas merecem os seguintes comentários:

- no intervalo 20 mm-40 mm de deslocamento do punção as curvas reais mostram maior carga de prensagem do que as simuladas. A esse respeito, inspeção da matriz e das amostras deformadas revelou marcas de arraste na superfície inferior destas e deposição de fragmentos de alumínio no canal. Da prática sabe-se que o alumínio tende a “empastar” ferramentas de corte e conformação quando na condição dúctil, como é o caso do Al AA1050. Esse efeito é puramente acidental, causa uma alteração no valor do coeficiente de atrito e não poderia ser previsto pela simulação computacional;
- tanto nas curvas simuladas como nas reais há uma inflexão no trecho inicial da curva, mais precisamente uma queda da carga de prensagem na vizinhança dos 10-12 mm de deslocamento do punção.

A queda de carga citada acima resulta de falta de contato entre a amostra e a face externa do canal da matriz, fenômeno conhecido como *corner gap*.^(10,11) Na Figura 4a há um detalhamento desse descolamento:

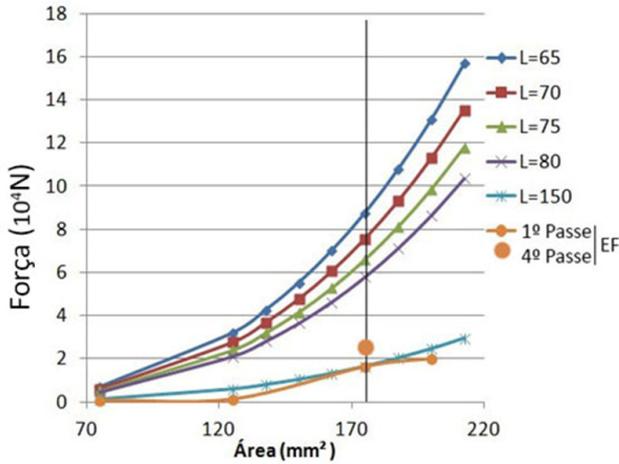


Figura 3. Comparação das forças de flambagem do punção: (i) calculadas pela equação de Euler para várias seções e comprimentos (L); (ii) calculadas pela simulação computacional (EF) para 1 e 4 passes. A linha (—●—) indica a força necessária para a execução do primeiro passe ECA, enquanto a linha vertical identifica a seção correspondente ao punção empregado neste trabalho.

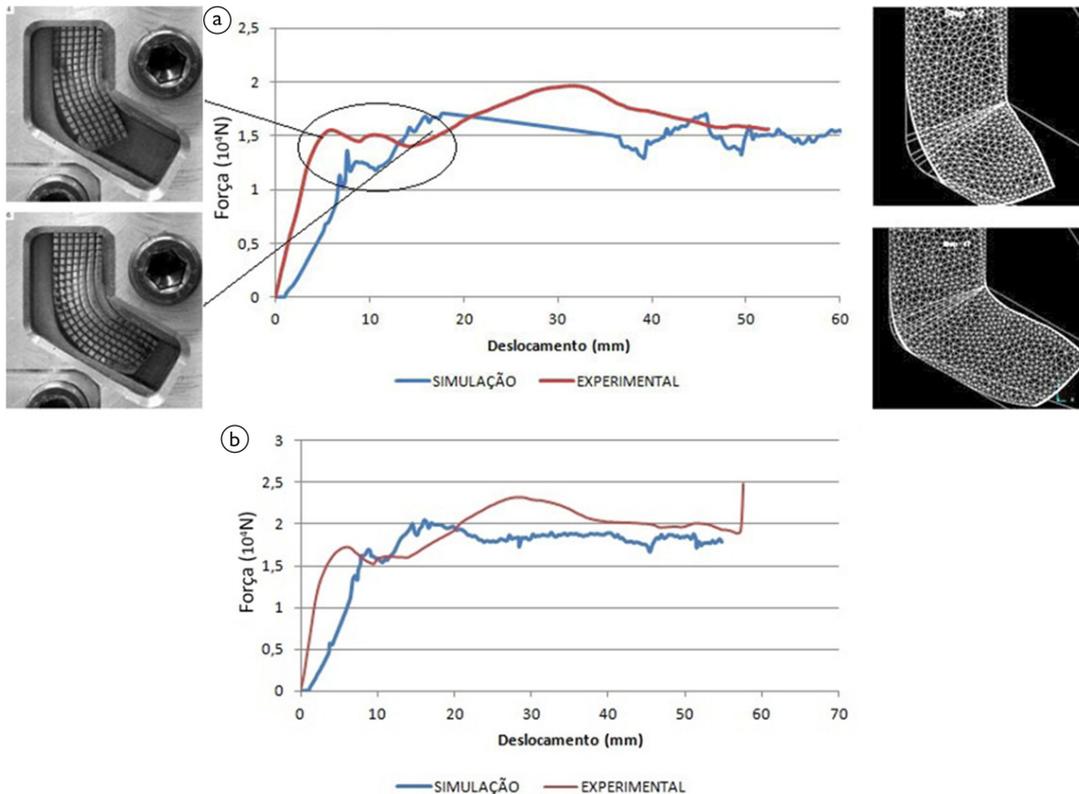


Figura 4. Cargas de compressão durante o processamento ECA em Al AA1050, obtidas por simulação numérica e por medidas experimentais: (a) um passe; (b) quatro passes. As imagens inseridas em (a)-esquerda foram obtidas em trabalho anterior⁽¹²⁾ e associam as perturbações da curva F x d com eventos de perda de contato entre a amostra e a parede do canal da matriz (seguir explicação no texto).

os insertos à esquerda são fotografias de um tarugo de Pb-62%Sn sendo deformado em uma matriz ECA dotada de uma janela lateral transparente, que permite visualização completa da passagem do tarugo.⁽¹²⁾ Os insertos à direita são imagens da simulação computacional aqui realizada. Em ambas as representações o *corner gap* é claramente visível, e como apresenta o conjunto de imagens da Figura 4 há perfeita concordância entre a ocorrência do fenômeno e a queda de carga na curva força *versus* deslocamento do punção. O efeito do *corner gap* é a diminuição local da deformação equivalente, o que é confirmado por numerosas investigações.^(13,14) Como é apresentado no seguimento deste trabalho, esse descolamento do material é a causa do aparecimento de uma região de menor dureza localizada na face inferior da placa.

A distribuição da deformação equivalente assim como simulada por EF é mostrada nas Figuras 5 e 6, para um e quatro passes, respectivamente. As medidas de microdureza realizadas em uma seção transversal localizada a meio comprimento da amostra e ao longo de uma linha segundo a direção z, acompanham as imagens dos campos de deformação. Comparando as figuras é evidente a persistência da região de menor dureza localizada na parte inferior da placa, e que esse efeito torna-se menos acentuado com o aumento da deformação de um para quatro passes.

Da escala da imagem por EF nas Figuras 5a e 6b, observa-se que a deformação equivalente em grande proporção do volume das placas está razoavelmente de acordo com a previsão da equação de Iwahashi:

$$\text{Figura 5a: } \varepsilon_{eq} = 0,6-0,7$$

$$\text{Figura 6b: } \varepsilon_{eq} = 2,5-3,0.$$

Pela Equação 1, os valores apresentados deveriam ser respectivamente 0,66 e 2,64.

A ocorrência de regiões de menor dureza e a influência que o número de passes e a geometria da matriz exercem sobre esse fenômeno são frequentemente tratados na literatura,^(13,15) associando diretamente a dureza com o grau de deformação localizada. A esse respeito, a Figura 7 mostra o mapeamento da microdureza Vickers sobre seções transversais na parte central das amostras 1X e 4X, indicando que o maior número de passes resulta em maior dureza e também em maior homogeneidade de deformação no volume da amostra. Esse efeito é claramente evidenciado pela coloração mais uniforme da segunda imagem.

Por fim, o desempenho da matriz quanto à efetividade na redução do tamanho de grão, e consequente aumento de resistência do material processado, foi avaliado por ensaios de tração e por observações ao MET. A Figura 8a mostra que a evolução das propriedades de tração com o número de passes segue o padrão usual

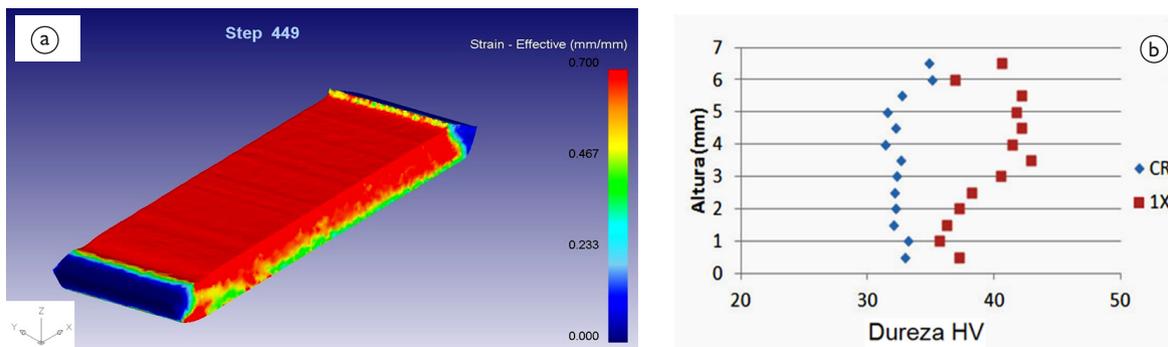


Figura 5. Distribuição da deformação equivalente e da microdureza Vickers na placa da liga AA1050 processada por um passe: (a) vista geral da simulação por EF mostrando os campos de deformação; (b) medidas de microdureza HV tomadas numa seção transversal, ao longo da altura da amostra, numa linha paralela à direção Z. (CR=como recebida).

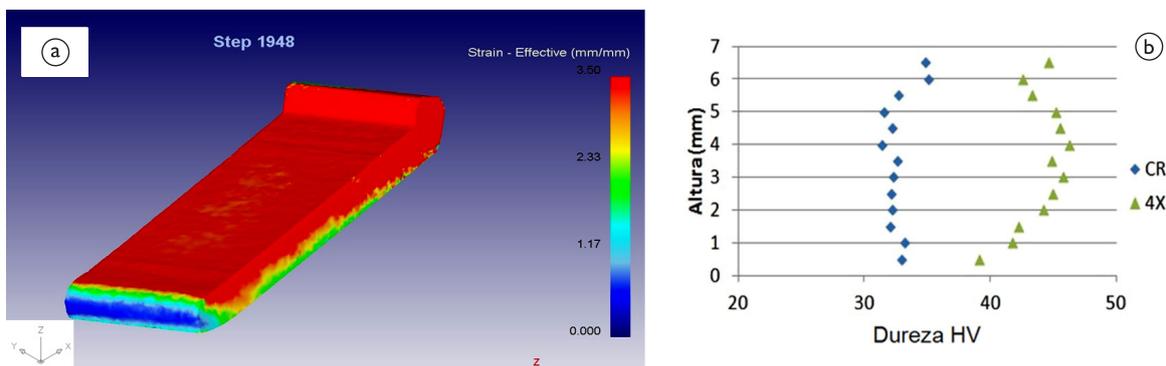


Figura 6. Distribuição da deformação equivalente e da microdureza na placa da liga AA1050 processada por quatro passes: (a) vista geral da simulação por EF mostrando os campos de deformação; (b) medidas de microdureza HV tomadas numa seção transversal, ao longo da altura da amostra, numa linha paralela à direção Z. (CR = como recebida).

dos materiais processados por ECA: aumento de resistência ($\approx 35\%$ para σ_u) e diminuição do alongamento até a fratura. Deve-se observar, porém, que esse alongamento se mantém relativamente constante após o primeiro passe. A microestrutura, da qual a Figura 8b é uma imagem representativa, mostra substancial refinamento de grão

e densidade de discordâncias relativamente baixa. O tamanho médio de grão, inicialmente da ordem de $50 \mu\text{m}$, após quatro passes é reduzido para $\approx 1 \mu\text{m}$. Em suma, as propriedades de tração e a microestrutura da liga AA1050 aqui processada sob forma de placas são similares às reportadas na literatura para geometria ECA convencional.^(16,17)

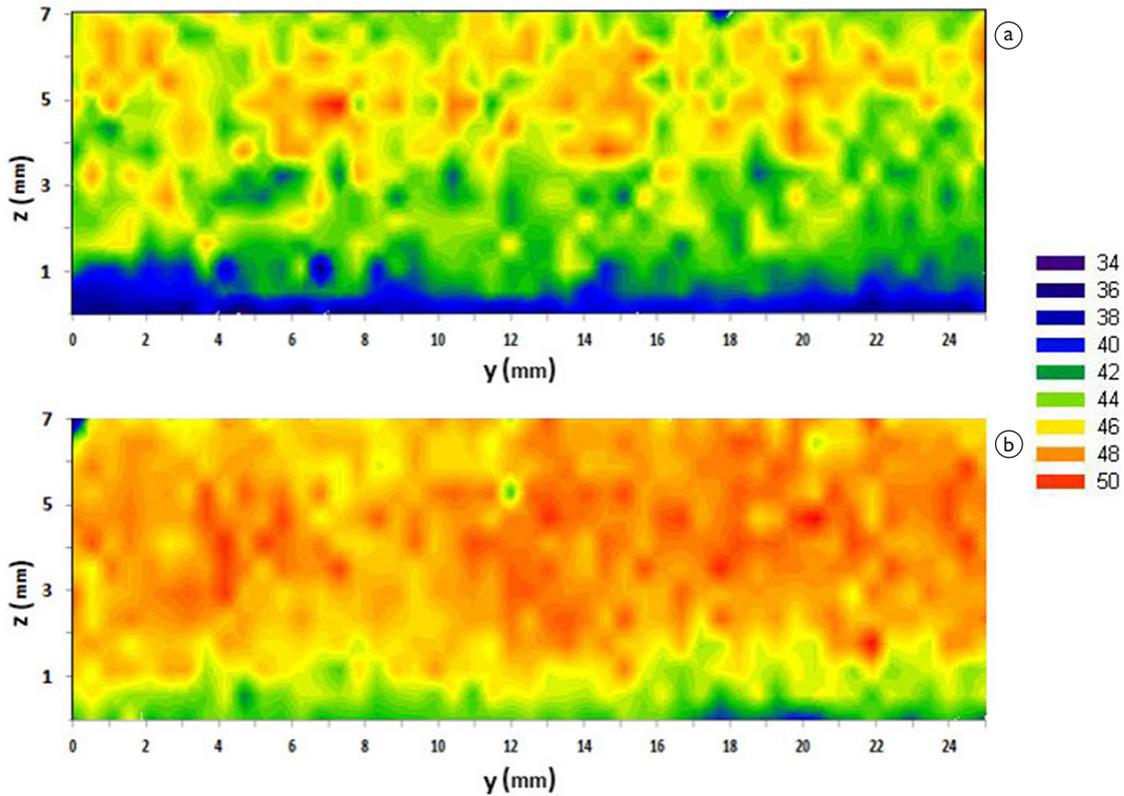


Figura 7. Mapeamento das medidas de microdureza na seção transversal da placa, obtido sobre uma malha com 637 pontos experimentais, após um (a) e quatro (b) passes ECA.

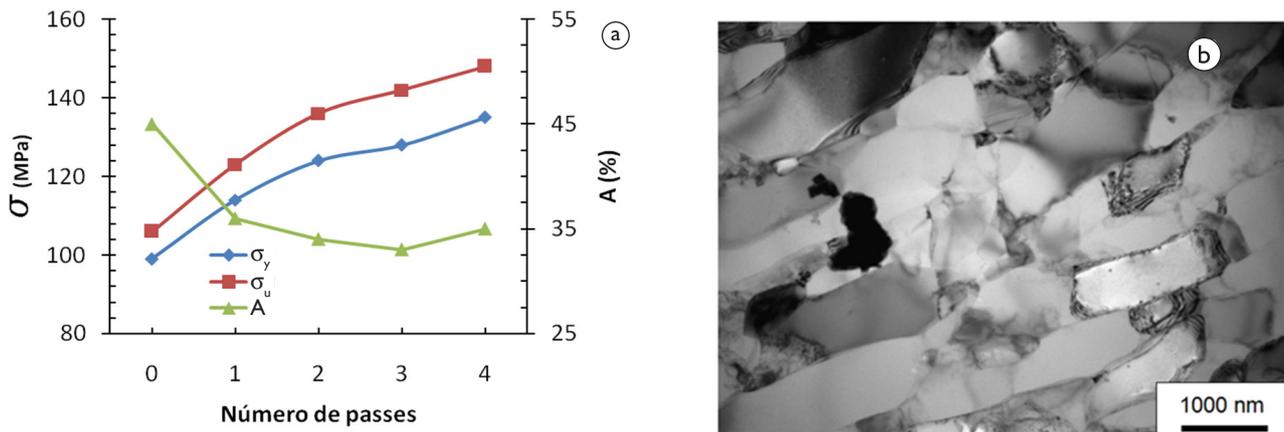


Figura 8. Exemplos do desempenho da matriz ECA aqui desenvolvida: (a) evolução com o número de passes da tensão de escoamento (σ_y), tensão máxima (σ_u), e alongamento até a fratura (A) de Al AA1050; (b) micrografia eletrônica de transmissão da liga AA1050 processada por quatro passes ECA, evidenciando refinamento dos grãos. O plano de observação corresponde ao plano Y da amostra.

4 CONCLUSÕES

- A deformação de chapas por ECA mostra-se eficiente no sentido de refinar a estrutura e aumentar a resistência mecânica de amostras da liga AA1050. Após quatro passes a tensão de escoamento alcança 135 MPa, contra os 99 MPa da condição inicial;
- A simulação computacional mostra que o processamento ECA de chapas da liga AA1050 com 7 mm de espessura é factível e as cargas de prensagem são muito inferiores às de flambagem de um punção construído em aço AISI H13;
- As curvas experimentais de força *versus* deslocamento do punção e as curvas calculadas concordam na detecção de uma queda na força de prensagem. De trabalhos anteriores e da simulação aqui realizada essa ocorrência pode ser identificada como destacamento da amostra da parede do canal, fenômeno conhecido como

corner gap. Este fenômeno é fielmente reproduzido pela presente simulação computacional; e

- A distribuição da deformação equivalente prevista pela simulação computacional para a liga AA1050 submetida a um e quatro passes ECA é satisfatoriamente validada por medidas de microdureza. O gradiente de dureza na direção Z reflete a menor deformação da camada inferior da placa e diminui com o aumento do número de passes ECA; e
- Em termos de microestrutura e de propriedades de tração do material deformado o desempenho da matriz é perfeitamente satisfatório.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - Fapesp e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

- 1 Valiev R, Langdon, TG. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement. *Progr Mater Sci*. 2006;51:881-981. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pmatsci.2006.02.003>
- 2 Iwahashi Y, Wang J, Horita Z, Nemoto M, Langdon TG. Principle of equal-channel angular pressing for the processing of ultra-fine grained materials. *Scripta Mater*. 1996;35:143-146. [http://dx.doi.org/10.1016/1359-6462\(96\)00107-8](http://dx.doi.org/10.1016/1359-6462(96)00107-8)
- 3 Sidor J, Miroux A, Petrov R, Kestens L. Microstructural and crystallographic effects of conventional and asymmetric rolling processes. *Acta Mater*. 2008;56:2495-2507. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2008.01.042>
- 4 Kliuga A, Ferrante M, Bolmaro RE. The evolution of texture in AA 1050 alloy deformed by Equal-Channel Angular Pressing. *Mater Sci. Forum*. 2011;667-669:577-582. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.667-669.577>
- 5 Kamachi M, Furukawa M, Horita Z, Langdon TG. Equal channel angular pressing using plate samples. *Mater Sci Eng A-Struct*. 2004;361:258-266. [http://dx.doi.org/10.1016/S0921-5093\(03\)00522-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0921-5093(03)00522-7)
- 6 Ferrasse S, Segal VM, Alford F. Effect of additional processing on texture evolution of Al10.5%Cu processed by equal channel angular extrusion (ECAE). *Mater Sci Eng A-Struct*. 2004;372:44-55. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2003.09.076>
- 7 Olejnik L, Rosochowski M, Richert M. Incremental ECAP of plates. *Mater Sci Forum*. 2008;584-586:108-113. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.584-586.108>
- 8 ASTM International. ASTM E8/E8M-1: Standard test methods for tension testing of metallic materials. West Conshohocken, PA; 2011.
- 9 Voce E. The relationship between stress and strain for homogeneous deformation. *J Inst Met*. 1948;74:537-562.
- 10 Deng GY, Lu C, Tieu AK, Su LH, Huynh NN, Liu XH. Crystal plasticity investigation of friction effect on texture evolution of Al single crystal during ECAP. *J Mater Sci*. 2010;45:4711-4717. <http://dx.doi.org/10.1007/s10853-010-4674-2>
- 11 Mendes Filho AA, Sordi VL, Rubert JB, Ferrante M. The influence of ECAP die geometry on shear strain and deformation uniformity. *Mater Sci Forum*. 2008;584-586:145-150. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.584-586.145>
- 12 Valio, GT, Ferrante M, Sordi VL. Extrusão em canal angular da liga Pb-52%Sn: Influência do projeto da matriz no grau e força de deformação. In: *Anais do 19. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – CBECIMAT; 2010; Campos do Jordão; Brasil. São Paulo: Metallum; 2010. p. 6875-6882.*
- 13 Alhajeri SN, Gao N, Langdon TG. Hardness homogeneity on longitudinal and transverse sections of an aluminum alloy processed by ECAP. *Mater Sci Eng A-Struct*. 2011;528:3833-3840. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2011.01.074>

- 14 Cerri E, Marco PP, Leo P. FEM and metallurgical analysis of modified 6082 aluminium alloys processed by multipass ECAP: Influence of material properties and different process settings on induced plastic strain. *J Mater Process Tech.* 2009;209:1550-1564. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.04.013>
- 15 Xu C, Langdon TG. The development of hardness homogeneity in aluminum and an aluminum alloy processed by ECAP. *J Mater Sci* 2007; 42:1542-1550. <http://dx.doi.org/10.1007/s10853-006-0899-5>
- 16 El-Danaf, Soliman MS, Almajid AA, El-Rayes MM. Enhancement of mechanical properties and grain size refinement of commercial purity aluminum 1050 processed by ECAP. *Mater Sci Eng A-Struct.* 2007;458:226-234. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2006.12.077>
- 17 Horita Z, Fujinami T, Nemoto M, Langdon TG. Improvement of mechanical properties of Al alloys using equal-channel angular pressing. *J Mater Process Tech.* 2001;117:288-292. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00783-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00783-X)

Recebido em: 19/10/2012

Aceito em: 12/03/2013