

MATRIZ DE EXTRUSÃO EM CANAL ANGULAR DEDICADA A CHAPAS - MODELAGEM COMPUTACIONAL, REALIZAÇÃO E DESEMPENHO¹

Philip Springer²
William Sussai³
Vitor Luis Sordi⁴
Maurizio Ferrante⁴

Resumo

Utilizando simulação computacional realizada via software Deform[®] e a respectiva comprovação experimental, foi projetada e construída uma matriz de Extrusão em Canal Angular dirigida ao processamento de chapas. Os resultados incluem o cálculo da carga de flambagem do punção, a força de prensagem e a distribuição da deformação equivalente em placas de Al AA1050 processadas por um e por quatro passes. A matriz foi construída em base às indicações da simulação. As forças de prensagem calculadas foram validadas por comparação com as curvas reais de força versus deslocamento do punção, e a distribuição da deformação equivalente foi comparada com dados de microdureza Vickers. A simulação foi validada e a matriz mostrou bom desempenho.

Palavras-chave: EF; Matriz ECA; Distribuição de deformação; Microdureza.

EQUAL CHANNEL ANGULAR PRESSING DIE DEDICATED TO PLATES - COMPUTATIONAL MODELLING, REALIZATION AND PERFORMANCE

Abstract

This work describes the development, via computational simulation employing the Deform[™] software, followed by experimental validation, of an Equal Channel Angular Pressing die directed to plate processing. Results included calculation of the critical buckling force of the punch, the pressing forces needed for deformation and the equivalent strain distribution within plates of Al AA1050 processed by one and by four passes. In the sequence, following the simulation results the die was manufactured. The calculated pressing forces were validated by comparison with real curves of force against punch displacement, and the equivalent strain distribution was compared with Vickers microhardness data. In all cases the simulation was satisfactorily validated and the die showed good performance.

Key words: FEM; ECAP die; Equivalent strain distribution; Microhardness.

¹ Contribuição técnica ao 67^o Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Físico, Depto. de Eng. de Materiais, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), SP, Brasil.

³ Engenheiro de Materiais, Depto. de Eng. de Materiais, UFSCar, Sp, Brasil.

⁴ Doutor, Depto. de Eng. de Materiais, UFSCar, Sp, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Materiais com microestrutura ultrafina, especificamente tamanho de grão entre 250 nm e 500 nm, exibem propriedades de grande interesse podendo ser obtidos por diversas tecnologias. Dentre estas destaca-se o processo conhecido como Extrusão em Canal Angular (ECA), que permite a produção de metais submicrocristalinos e com dimensões de interesse comercial.⁽¹⁾ Nessa tecnologia um tarugo com seção transversal quadrada ou circular é inserido em um canal formado por dois segmentos que fazem ângulo entre si, a deformação ocorrendo por cisalhamento simples. No projeto da matriz são importantes o ângulo entre os canais, (Φ), e o ângulo de curvatura que denota o arco que faz a concordância entre os mesmos, (ψ). A maioria dos estudos 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 (Equação 1).⁽²⁾

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

Além das variáveis associadas à geometria da matriz o processo conta com a possibilidade de alterar o caminho da deformação.⁽²⁾ Como mencionado, o efeito mais importante do processo ECA é o grande aumento da resistência mecânica do material, consequência da acentuada redução do tamanho de grão. Foi observado também, que a deformação por cisalhamento causa alteração da textura, o que pode melhorar as características de conformabilidade de chapas.^(3,4) Assim, em estudos desse tipo surge a necessidade de estender o processo de deformação ECA a geometrias bidimensionais. No entanto, ainda há escassas referências sobre o processamento de chapas,⁽⁵⁻⁷⁾ nem suficientes conhecimentos sobre o grau de homogeneidade de deformação de produtos nessa geometria.

Esta investigação apresenta a metodologia do desenvolvimento de uma matriz ECA dedicada ao processamento de chapas. Foi abordado o aspecto estrutural e a dependência das características do produto com as características geométricas da matriz. Como material de trabalho escolheu-se chapas de Al comercial AA1050.

Forças e deformações foram modeladas utilizando a técnica dos Elementos Finitos (EF) e um software comercial, e os resultados foram validados experimentalmente pelo registro das forças de prensagem e medidas de microdureza.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizadas chapas de Al comercial AA1050 com espessura de 7 mm, fabricadas por fundição semicontínua de placas. Das chapas foram cortadas amostras com seção transversal de 7 x 25 mm² e 70 mm de comprimento.

Utilizando-se o software de EF DEFORMTM, 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 chapas de Al AA1050 com as dimensões acima citadas. Utilizou-se uma malha 3D com elementos tetraédricos e coeficiente de atrito igual a 0,12, valor este adequado ao par alumínio/aço com lubrificação. Com isso foi calculada a distribuição da deformação equivalente no volume das chapas após um e após quatro passes ECA. Especial

atenção foi dada 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). Para o presente trabalho, em base a experiência anterior em processamento ECA de tarugos foi testada a configuração $R = 3r = 0 \text{ mm}$ (3×0). Ensaio de compressão foram realizados, com o intuito de obter a relação entre a tensão e deformação (informação necessária para os cálculos por EF), tanto na condição inicial, não deformada, como após um, dois e três passes ECA. Corpos de prova cilíndricos (6 mm de diâmetro e 9 mm de altura), foram ensaiados em compressão até uma deformação de 60% em uma máquina Instron 5500 a uma taxa de 1 mm/min. Para a modelagem do processo ECA, foram utilizados os primeiros 3% de deformação plástica.

Foi construída uma matriz em aço AISI H13, temperado e revenido, com a forma geral esquematizada na Figura 1b; os ângulos de curvatura R e r são idênticos aos utilizados na simulação. As prensagens ECA foram executadas em uma máquina Kratos de tração-compressão, e as cargas de prensagem foram registradas em função do avanço do punção. A homogeneidade da deformação foi avaliada por medidas de microdureza Vickers, todas realizadas com carga de 300 gf, aplicados por 15 s na seção transversal da chapa, em duas direções normais entre si, e por mapeamento completo da seção transversal utilizando uma malha bidimensional com 637 pontos sobre a qual foi realizado igual número de impressões de dureza.

As medidas transversais foram tomadas ao longo de três linhas paralelas à maior dimensão da seção transversal da chapa: duas localizadas a 0,3 mm das superfícies superior e inferior e a terceira na região central, a 3,5 mm das superfícies. As medidas verticais foram tomadas ao longo de uma linha perpendicular às linhas das medidas transversais. A identificação das amostras emprega um numeral para indicar o número de passes seguido da letra X.

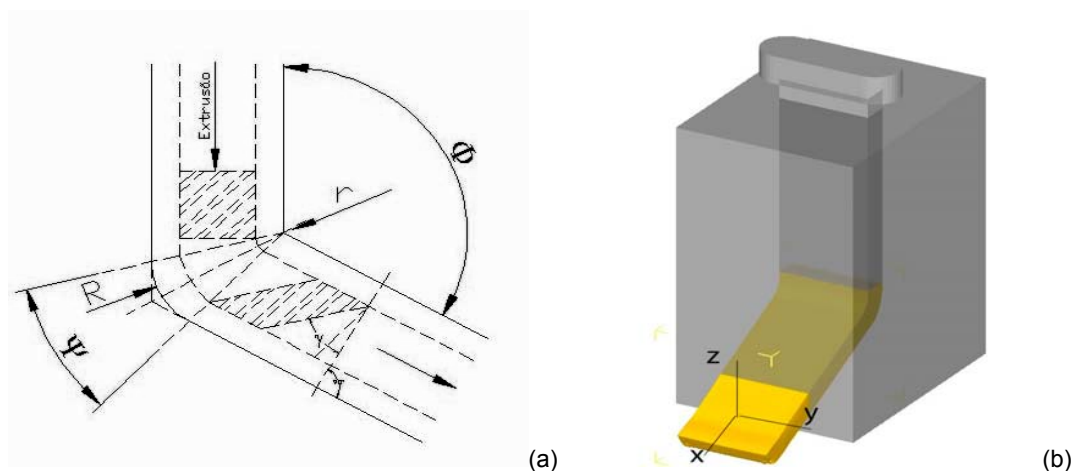


Figura 1. Matriz ECA: (a) variáveis geométricas dos canais e a esquematização da deformação cisalhante da amostra; e (b) esquema da matriz projetada para o processamento de chapas.

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 1^o passe, da amostra 1X para o 2^o passe etc. (Figura 2). As curvas experimentais foram digitalizadas e os valores de σ_y e dos parâmetros da equação de Hollomon (Equação 2),⁽⁸⁾ estão na Tabela 1.

$$\sigma = \sigma_y + K\varepsilon^n \quad (2)$$

Onde σ é a tensão, ε a deformação, σ_y a tensão de escoamento, K o coeficiente de resistência e n o expoente de encruamento.

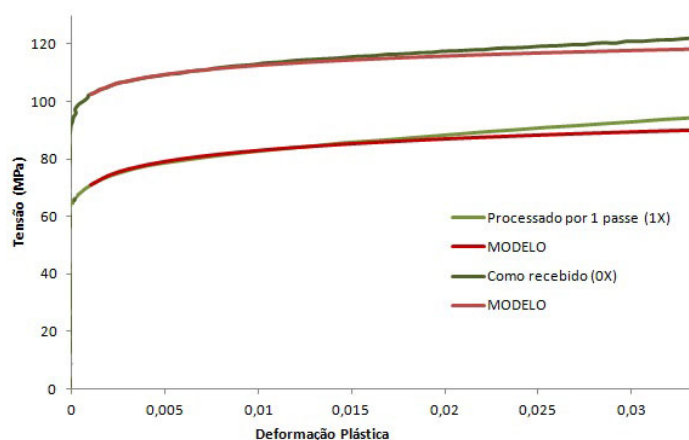


Figura 2. Curvas tensão deformação experimentais da amostra não deformada e após um passe ECA, e seus respectivos modelos.

Desses dados fica claro o potencial do processamento ECA em aumentar a resistência mecânica, mas em detrimento da capacidade de endurecimento por deformação; notar a diminuição do expoente de encruamento, que é um parâmetro diretamente relacionado com a atividade do fenômeno da recuperação dinâmica.⁽⁹⁾

Tabela 1. Tensão de escoamento, coeficientes de resistência e expoentes da equação de Hollomon para Al AA1050

Amostra	σ_y (MPa)	n	k (MPa)
0X	70	0,07	114
1X	102	0,04	136
2X	122	0,06	182
3X	128	0,03	161

Os aspectos mais críticos do projeto e construção de uma matriz ECA são a correta escolha dos parâmetros geométricos Φ e ψ , já definidos na Introdução, e o acabamento dos canais. Sob o plano 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 caso de se operar com chapas finas, portanto baixo momento de inércia do punção. A esse respeito, a Figura 3 relaciona as forças de flambagem com a seção transversal do punção para vários comprimentos do mesmo. Observa-se que para amostras (e punção) com seção transversal igual à utilizada no presente trabalho ($7 \times 25 \text{ mm}^2$), no 1º passe a máxima força calculada pela simulação computacional do processo ECA para Al AA1050 é $\sim 2.000 \text{ kgf}$. A relação dessa carga com a carga de flambagem do punção é uma informação essencial para a correta operação do processo; notar que a condição mais desfavorável é o início da prensagem, quando a razão de aspecto do punção é máxima. Notar também que para o punção aqui utilizado, que tem comprimento igual a 70 mm e seção transversal de 175 mm^2 , a carga de flambagem é da ordem de 8.000 kgf, o que implica que materiais com resistência mecânica muito superior possam ser processados com segurança, nesta matriz.

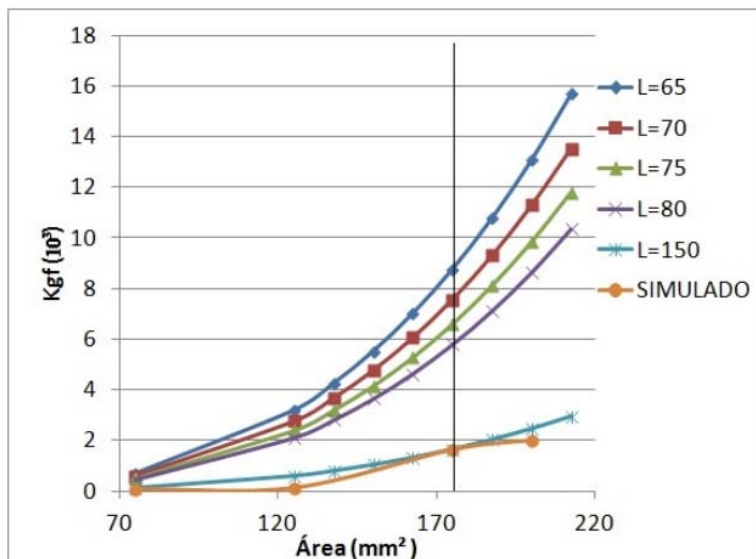


Figura 3. Relação entre a carga de flambagem e a seção transversal do punção, para vários comprimentos (L) do mesmo, assim como calculados pela simulação computacional. A linha (—●—) indica a força necessária para a execução do primeiro passe ECA, em função da seção transversal da chapa, enquanto a linha vertical indica a área da seção transversal do punção.

A Figura 4 compara as forças necessárias para a deformação ECA calculadas pela simulação numérica, com as registradas pela célula de carga da prensa. As cargas referem-se a um e a quatro passes. Observa-se que a geometria do canal manteve as cargas muito abaixo da de flambagem indicada na Figura 3, mesmo durante o 4^o passe. A simulação e o experimento são bastante próximos no que toca a força média de prensagem; desvios da concordância e inflexões das curvas podem ser comentados como segue: (i) 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 Al no canal. Da experiência prática sabe-se que o Al 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 na simulação computacional; e (ii) tanto nas curvas simuladas como nas reais há uma inflexão no trecho inicial da curva, mais precisamente uma diminuição da carga de prensagem na vizinhança dos 10 mm - 12 mm de deslocamento do punção.

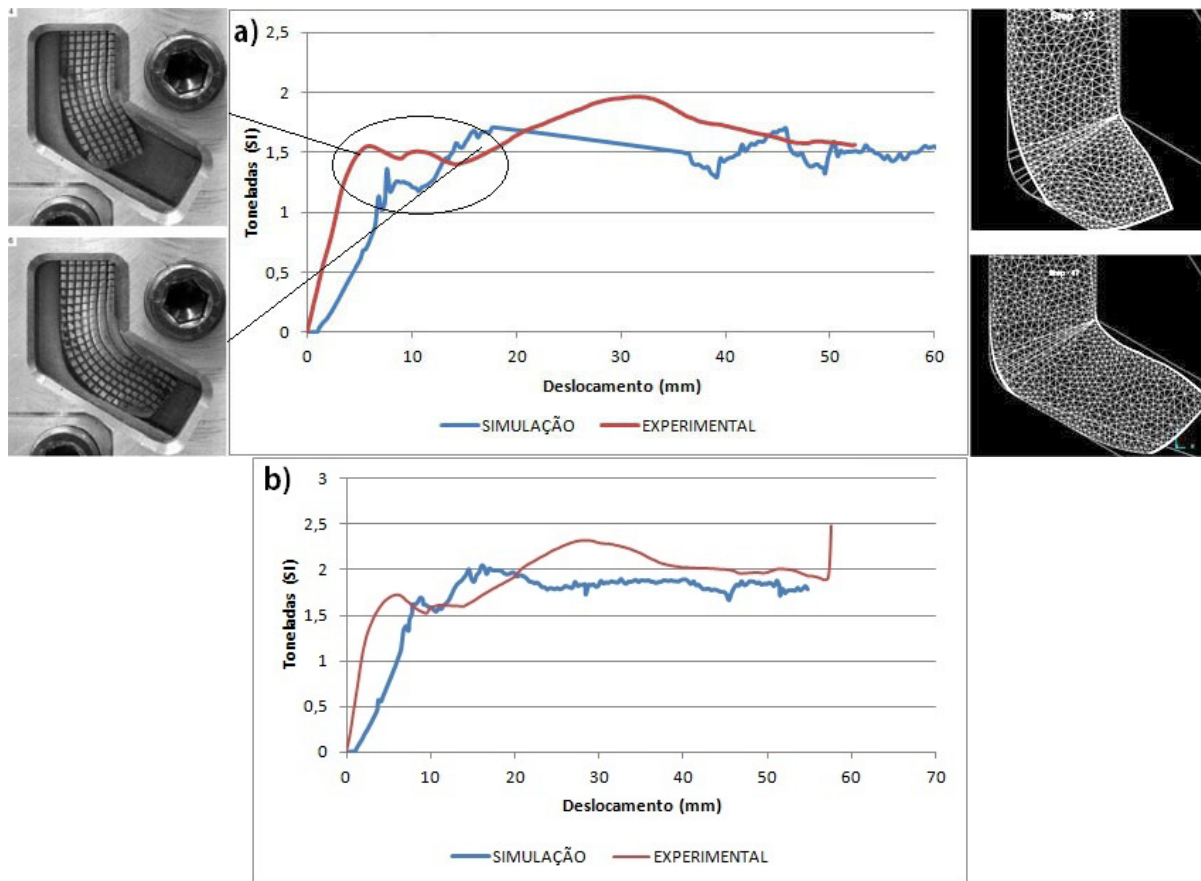


Figura 4. Forças de compressão durante o processo de deformação por ECA, obtidas via simulação numérica e pela leitura da célula de carga da prensa: (a) um passe; (b) quatro passes. Os inserts em (a) mostram eventos de perda de contato da amostra com a parede do canal da matriz, seguir explicação no texto.

Esta ocorrência resulta da falta de contato entre a superfície inferior da amostra e o canal da matriz, fenômeno este conhecido como *corner gap*.^(10,11) Na Figura 4 a há um detalhamento desse descolamento: o inserto da esquerda é a fotografia 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⁾ O inserto da direita é uma imagem da presente simulação computacional. Em ambas as representações o *corner gap* é claramente visível, e como mostra 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 maior efeito do *corner gap* é a diminuição local da deformação equivalente, o que é confirmado por numerosos trabalhos.^(13,14) Como será visto adiante, esse descolamento do material está associado e 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 acompanham as imagens dos campos de deformação.

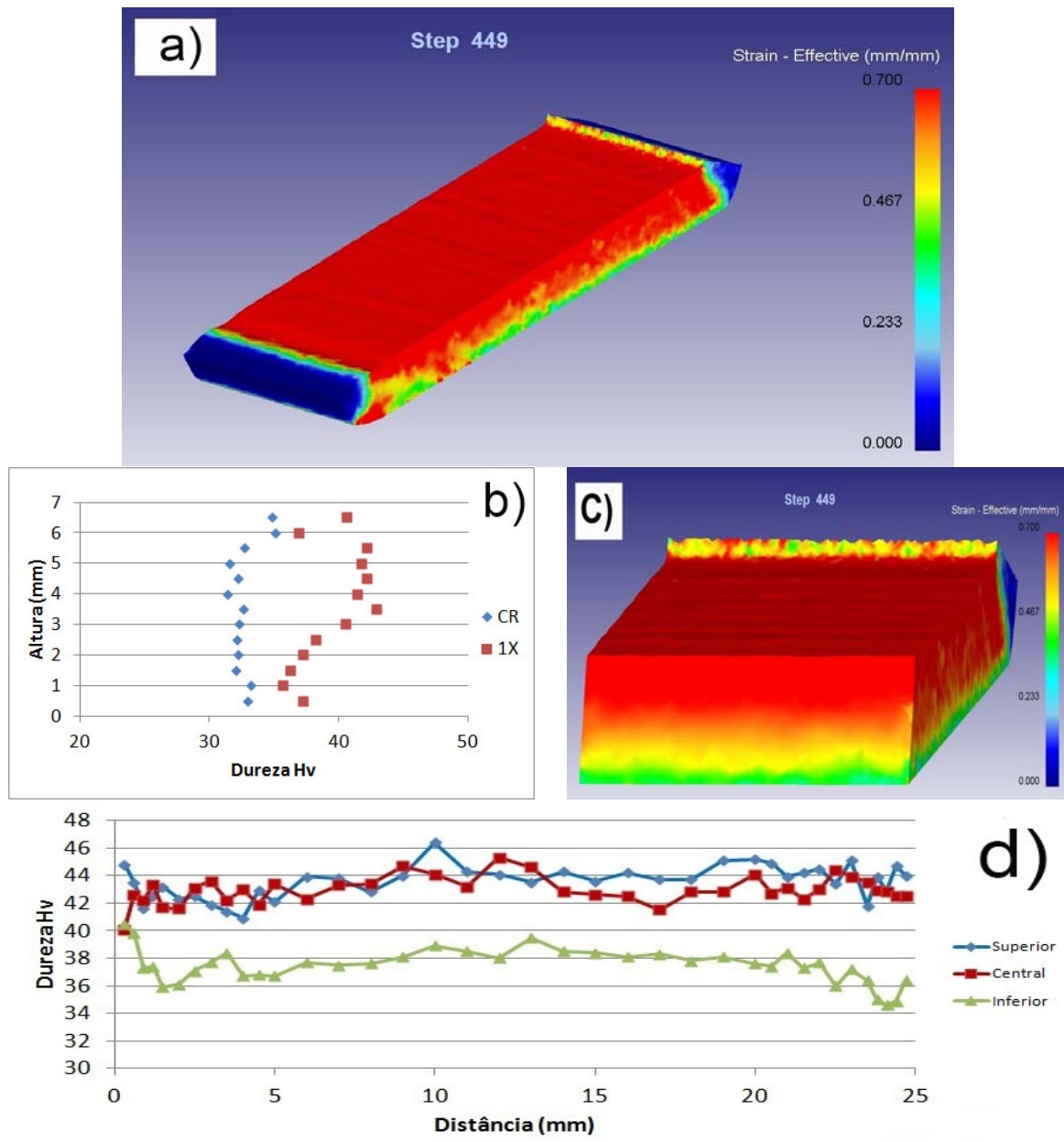


Figura 5. Distribuição da deformação equivalente e da microdureza Vickers na placa de AA1050 processada por um passe: (a) vista geral da simulação por EF, mostrando os campos de deformação; (b) medidas de microdureza Hv, tomadas numa seção transversal da placa, ao longo de uma linha paralela à espessura da placa (CR=como recebida); (c) simulação por EF da distribuição da deformação equivalente na mesma seção; e (d) medidas transversais de microdureza, na mesma seção, mas ao longo de três linhas perpendiculares à espessura da placa. Carga de 300 gf e tempo de ação de 15 s.

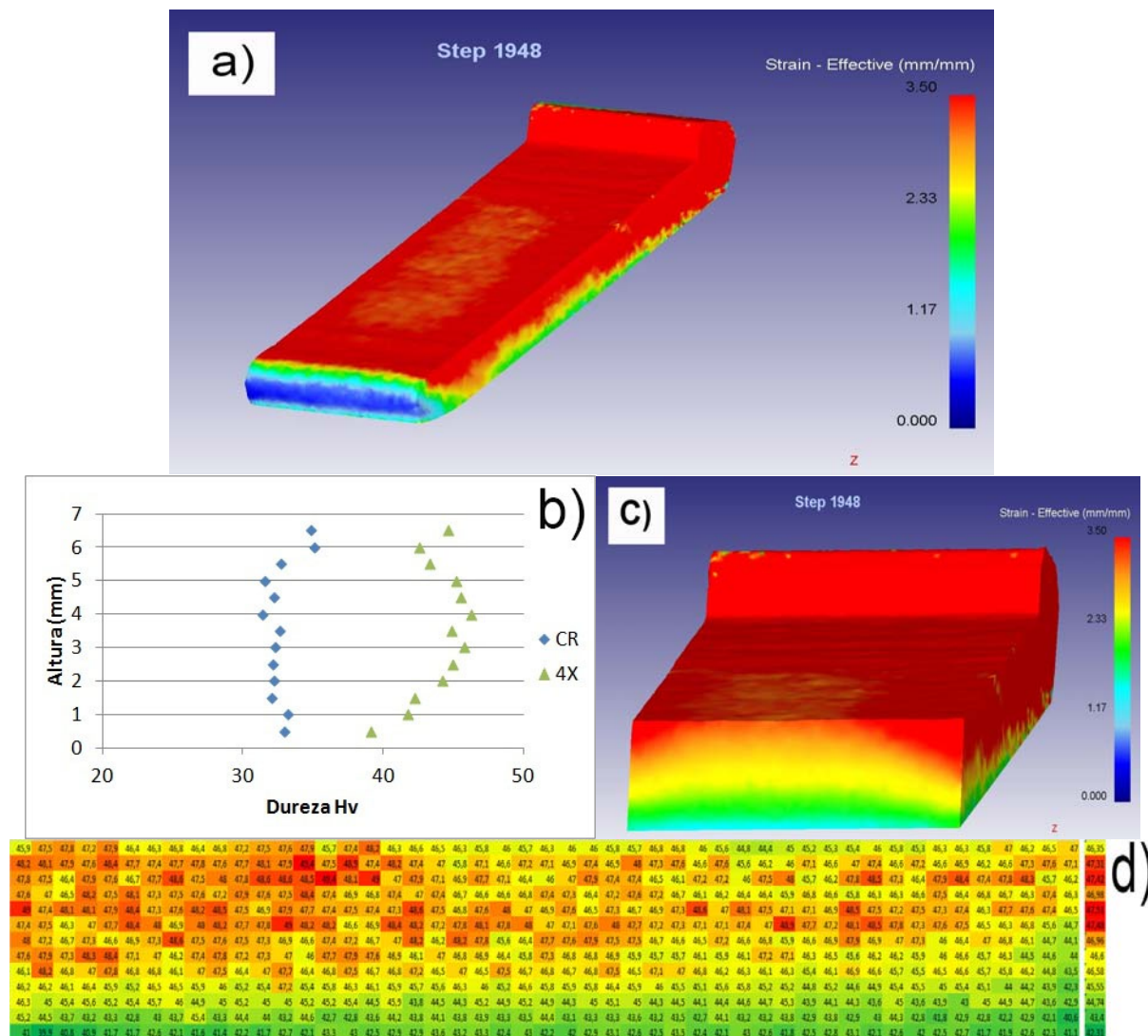


Figura 6. Distribuição da deformação equivalente e da microdureza na placa de AA1050 processada por quatro passes: (a) vista geral da simulação por EF, mostrando os campos de deformação; (b) medidas de microdureza Hv, tomadas numa seção transversal da placa, ao longo de uma linha paralela à espessura da placa; (c) simulação por EF da distribuição da deformação na mesma seção; (d) medidas de microdureza Hv, na mesma seção, obtidos sobre uma malha com 637 pontos; a última coluna à direita indica a dureza média de cada linha horizontal da grade.

Das Figuras 5 e 6 conclui-se que a simulação foi satisfatoriamente validada pelas medidas experimentais de dureza. De fato, para o 1º passe a distribuição da deformação equivalente mostra uma camada de dureza menor junto à superfície inferior com espessura de ~12 mm. A dureza aumenta gradativamente até cerca de metade da espessura da placa e estabiliza-se no restante da seção (Figuras 5a e 5c). Esse comportamento é confirmado pelas medidas de dureza ao longo da vertical (Figura 5b). Apesar de corresponder a uma linha da seção, apenas, a variação de dureza em questão é representativa da seção inteira (Figura 5d). Esta conserva a mesma feição da Figura 5b no sentido vertical, e mostra que ao longo das linhas horizontais a dureza, portanto o grau de deformação, é razoavelmente constante.

Quanto ao comportamento da distribuição da deformação equivalente, para quatro passes as Figuras 6a a 6c mostra feição semelhante à descrita acima, mas a camada inferior de menor dureza tem maior espessura, alcançando quase a metade da espessura da placa. A simulação é também confirmada pelas medidas de

microdureza (Figuras 6b a 6d), mas deve-se atentar que os valores absolutos desta propriedade são agora maiores do que os medidos após o primeiro passe. A observação de a espessura da camada de baixa dureza aumenta com a deformação contrasta com as de outros investigadores, segundo os quais, com o aumento do número de passes diminui a altura da camada de menor dureza.^(15,16)

Deve-se atentar, porém, que no presente trabalho foi utilizada a rota A de deformação, e que investigações similares, geralmente utilizam a rota B_C.

CONCLUSÕES

- A deformação ECA de chapas mostrou-se eficiente no sentido de aumentar a resistência mecânica de amostras de Al AA1050. Após quatro passes a tensão de escoamento alcançou 128 MPa, contra os 70 MPa da condição inicial;
- a simulação computacional mostrou que o processamento ECA de chapas de Al AA1050 com 7 mm de espessura é perfeitamente factível, pois as cargas de prensagem são muito inferiores às de flambagem de um punção construído em aço AISI H13. As cargas de prensagem calculadas por EF, referentes a um e quatro passes, foram validadas por dados experimentais obtidos diretamente da prensa, havendo boa concordância cálculo – experimento;
- as curvas experimentais de força *versus* deslocamento e as curvas calculadas, concordam na detecção de uma queda na força de prensagem. De trabalhos anteriores e da simulação aqui realizada essa ocorrência foi identificada como destacamento da amostra da parede do canal, fenômeno conhecido como *corner gap*. Este fenômeno foi fielmente reproduzido pela presente simulação experimental;
- a distribuição da deformação equivalente prevista pela simulação computacional para Al AA1050 submetido a um e quatro passes ECA, foi satisfatoriamente validada por medidas de dureza. Foi observada uma camada de menor dureza junto à superfície inferior das placas; e
- ao contrário do comumente observado, o aumento da deformação não levou à diminuição de espessura da camada de menor dureza.

REFERÊNCIAS

- 1 VALIEV, R., LANGDON, T. G. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement, **Progress in Materials Science**, V. 51, p. 881–981, 2006.
- 2 IWAHASHI, Y., WANG, J., HORITA, Z., NEMOTO, M., LANGDON, T.G. Principle of Equal-Channel Angular Pressing for the processing of ultra-fine grained materials. **Scripta Materialia**, V. 35, p. 143-146 , 1996.
- 3 SIDOR, J., MIROUX, A., PETROV, R., KESTENS, L. Microstructural and crystallographic effects of conventional and asymmetric rolling processes. **Acta Materialia**, V. 56, p. 2495-2507, 2008
- 4 KLIAUGA, A., FERRANTE, M., BOLMARO, R.E. The evolution of texture in AA 1050 alloy deformed by Equal-Channel Angular Pressing. **Materials Science Forum**, V. 667-669, p. 577-582, 2011.
- 5 KAMACHI, M., FURUKAWA, Y., HORITA, Z., LANGDON, T.G. Equal channel angular pressing using plate samples. **Materials Science and Engineering**, V. A361, p. 258-266, 2004.

- 6 FERRASSE, S., SEGAL, V.M., ALFORD, F. Effect of additional processing on texture evolution of Al10,5%Cu processed by equal channel angular extrusion (ECAE). **Materials Science and Engineering**, V. A372, p. 44-55, 2004.
- 7 OLEJNIK, L., ROSOCHOWSKI, M., RICHERT, M. Incremental ECAP of plates. **Materials Science Forum**, V. 584-586, p. 108-113, 2008.
- 8 DIETER, G. E. Mechanical Metallurgy. **McGraw Hill Company**, p. 0-751, 1988.
- 9 Kocks, U.F., Mecking H. Physics and Phenomenology of work hardening: the FCC case. **Progress in Materials Science**, V.48 , p. 171-273, 2003
- 10 DENG, G.Y., LU, C., TIEU, A.K., SU, L.H., HUYN, N.N., LIU, X.H. Crystal plasticity investigation of friction effect on texture evolution of Al single crystal during ECAP. **Journal of Materials Science**, V. 45, p. 4711-4717, 2010.
- 11 MENDES FILHO, A de A., SORDI, V.L., RUBERT, J.B., FERRANTE, M. The influence of ECAP die geometry on shear strain and deformation uniformity. **Materials Science Forum**, V. 584-586, p. 145-150, 2008.
- 12 VALIO, G. T., SORDI, V.L., FERRANTE, M. Otimização do projeto de matrizes para extrusão em canal angular visando homogeneidade de deformação. Congresso dos Alunos em Ciência e Engenharia de Materiais - CECEMM, Florianópolis, 2008 - CD-ROM.
- 13 ALHAJERI, S.N., GAO, N., LANGDON, T.G. Hardness homogeneity on longitudinal and transverse sections of an aluminum alloy processed by ECAP. **Materials Science and Engineering**, V. A528, p. 3833-3840, 2011.
- 14 CERRI, E., de MARCO, P.P., 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. **Journal of Materials Processing Technology**, V. 209, p. 1550-1564, 2009.
- 15 LUIS PEREZ, J.C. On the correct selection of the channel die in ECAP processing. **Scripta Materialia**, V. 50, p. 387 - 393, 2004.
- 16 DUAN, Z.C., LANGDON, T.C. An experimental evaluation of a special ECAP die containing two equal arcs of curvature. **Materials Science and Engineering**, V. A528, p. 4173-4179, 2011.