



# ANÁLISE DO CONFRONTO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DO PROCESSO DE ECAP REALIZADOS COM AI PURO<sup>1</sup>

*Fabício Dias Magalhães<sup>2</sup>  
Flaviano dos Santos Rodrigues<sup>3</sup>  
Marcelo Torres de Oliveira<sup>4</sup>  
Adriano Alves Rabelo<sup>5</sup>*

## Resumo

O presente trabalho tem como objetivo analisar e estudar, através de métodos de elementos finitos, o processo ECAP, e comparar os resultados numéricos com resultados obtidos por procedimentos experimentais, para análise da deformação efetiva e sua respectiva influência sobre as propriedades mecânicas. O ECAP foi realizado usando Al puro em uma matriz com um ângulo interno de 120° entre os canais verticais e horizontais com velocidade de processamento de 5 mm/s, a peça trabalhada tem dimensão quadrada de 20 x 20 mm. A simulação foi feita no software comercial DEFFORM-2D, sendo usadas malhas grosseiras para facilitar o processamento, devido a qualidade dos equipamentos de informática. O coeficiente de atrito, entre a matriz e a peça foi considerado zero. No fim do procedimento experimental foram tiradas macroestruturas para avaliar as linhas de deformação e compará-las com as linhas de deformação numéricas. Os altos níveis de deformação impostos pelo processo promovem um refinamento das estruturas o que leva ao aumento da dureza, a distribuição não homogênea da deformação implica em um perfil de dureza irregular, comprovada com o auxílio do modelo implementado.

**Palavras-chave:** Elementos finitos; Alumínio; ECAP; Deformação.

## ANALYSIS OF THEORETICAL AND EXPERIMENTAL COMPARISON OF THE PROCESS ECAP MADE WITH PURE AL

## Abstract

This paper aims to analyze and study through finite element methods, the ECAP process, and compare the results with numerical results obtained by experimental procedures for analysis of the effective strain and its corresponding influence on the mechanical properties. The ECAP was conducted using a pure Al matrix with an internal angle of 120 ° between the horizontal and vertical channels with a processor speed of 5 mm / s, the workpiece has dimension square of 20 x 20 mm. The simulation was made in commercial software DEFFORM-2D, with coarse meshes used to facilitate processing, owing the quality of computers equipments. The coefficient of friction between the matrix and the number was considered zero. At the end of the experimental procedure were taken to assess the macro-deformation lines and compares them with lines of numerical deformation. The high levels of strain imposed by the process promote a refinement of the structures which leads to increased hardness, non-homogeneous distribution of deformation implies a hardness profile irregular proven with the help of the implemented model.

**Key words:** Finite elements; Aluminum; ECAP; Deformation.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

<sup>2</sup> *Aluno de Graduação de Engenharia de Materiais – UFPA – Fabricio742@hotmail.com*

<sup>3</sup> *Aluno de Graduação de Engenharia de Materiais – UFPA - oliveira.engmat@gmail.com*

<sup>4</sup> *Aluno de Graduação de Engenharia de Materiais – UFPA - rodriguesengmat05@hotmail.com*

<sup>5</sup> *Professor Dr. do curso de Engenharia de Materiais – UFPA - adrianoalves@ufpa.br*



## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos a Prensagem Angular em Canais Iguais (ECAP) tem sido objeto de intensas investigações, devido à sua capacidade de produzir refino de grão a níveis de escalas nanométricas, mantendo a seção transversal original da peça.<sup>(1)</sup> O que torna o material bem resistente em acordo com a relação de Hall-Petch.

O ECAP é um processo de deformação por cisalhamento puro que consiste em fazer passar uma amostra de material de uma extremidade à outra de dois canais seqüenciais que se interceptam fazendo entre si um ângulo  $\varphi$ . Diferentemente do que ocorre com os processos de conformação tradicionais onde as dimensões da peça são alteradas; durante o ECAP não há alteração na seção transversal da peça de maneira que a operação pode ser repetida várias vezes.<sup>(2)</sup> Segundo Raab,<sup>(3)</sup> o número otimizado de ciclos de ECAP tradicional está em torno de 6 a 12 passes.

A obtenção de grãos uniformemente refinados do material tem que está associada a uma distribuição da deformação mais homogênea possível ao longo do tarugo, mas é observada uma distribuição irregular da deformação.

A aplicação do método de elementos finitos (MEF) a esse processo tem por finalidade analisar qual o comportamento das deformações do tarugo e das cargas envolvidas no processo, e como alguns parâmetros de processo, tais como: o ângulo do canal, as condições de atrito entre o tarugo, matriz e a temperatura, influenciam naqueles resultados. Há um significativo número de trabalhos em que o método de elementos finitos é aplicado ao processo ECAP, porém a maior parte deles se concentra nos estudos das deformações do tarugo, porém, poucos compararam seus resultados com os obtidos experimentalmente.<sup>(4)</sup>

Neste contexto o presente trabalho tem como objetivo analisar numericamente e experimentalmente o processo ECAP com ângulo entre os canais de 120°. Comparar os resultados fazendo correlações entre os dados obtidos experimentalmente e os resultados numéricos.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios experimentais foram realizados utilizando alumínio comercialmente puro. Antes de ser processado por ECAP, foram re-fundidos e vazados em lingoteira com formato do corpo de prova desejado.

A matriz utilizada nos ensaios foi fabricada por usinagem utilizando-se o aço SAE 1045, e para a confecção do canal foi utilizando o processo de fresamento. O canal foi submetido a um polimento visando minimizar o atrito nessa região. A matriz foi construída com um ângulo de 120° entre os canais de entrada e saída ( $\varphi$ ) e com o ângulo do cotovelo externo ( $\psi$ ) nulo. Essa matriz é do tipo bi-partida e suas partes são unidas por parafusos de aço capazes de suportar os esforços desenvolvidos no processo.

Os corpos de prova foram obtidos com dimensões pouco abaixo às da matriz. O punção usado no ensaio foi fabricado em aço e com seção transversal semelhante à do corpo de prova, mantendo uma pequena folga entre o canal e o punção.

O processo de extrusão foi realizado utilizando prensa hidráulica de carga máxima de 100 toneladas, à temperatura ambiente e com uma velocidade de

5 mm/min. Para reduzir os efeitos do atrito, evitando problemas no processo, o canal foi lubrificado com pó de grafite e graxa, conforme descreve a Figura 1.

O modelamento computacional do ECAP foi feito com o software comercial DEFORM-2D. O modelo criado foi bidimensional e a hipótese de deformação plana usualmente utilizada em outros trabalhos,<sup>(5,6)</sup> foi adotada. Dos componentes do ensaio experimental, apenas o tarugo foi modelado como sendo um corpo deformável.

A discretização do tarugo foi realizada utilizando elementos lineares quadrangulares. A quantidade de elementos do tarugo é 500, número esse obtido pela boa combinação de resultado e tempo de processamento da máquina. Foram realizadas simulações sem atrito, para facilitar o modelamento.

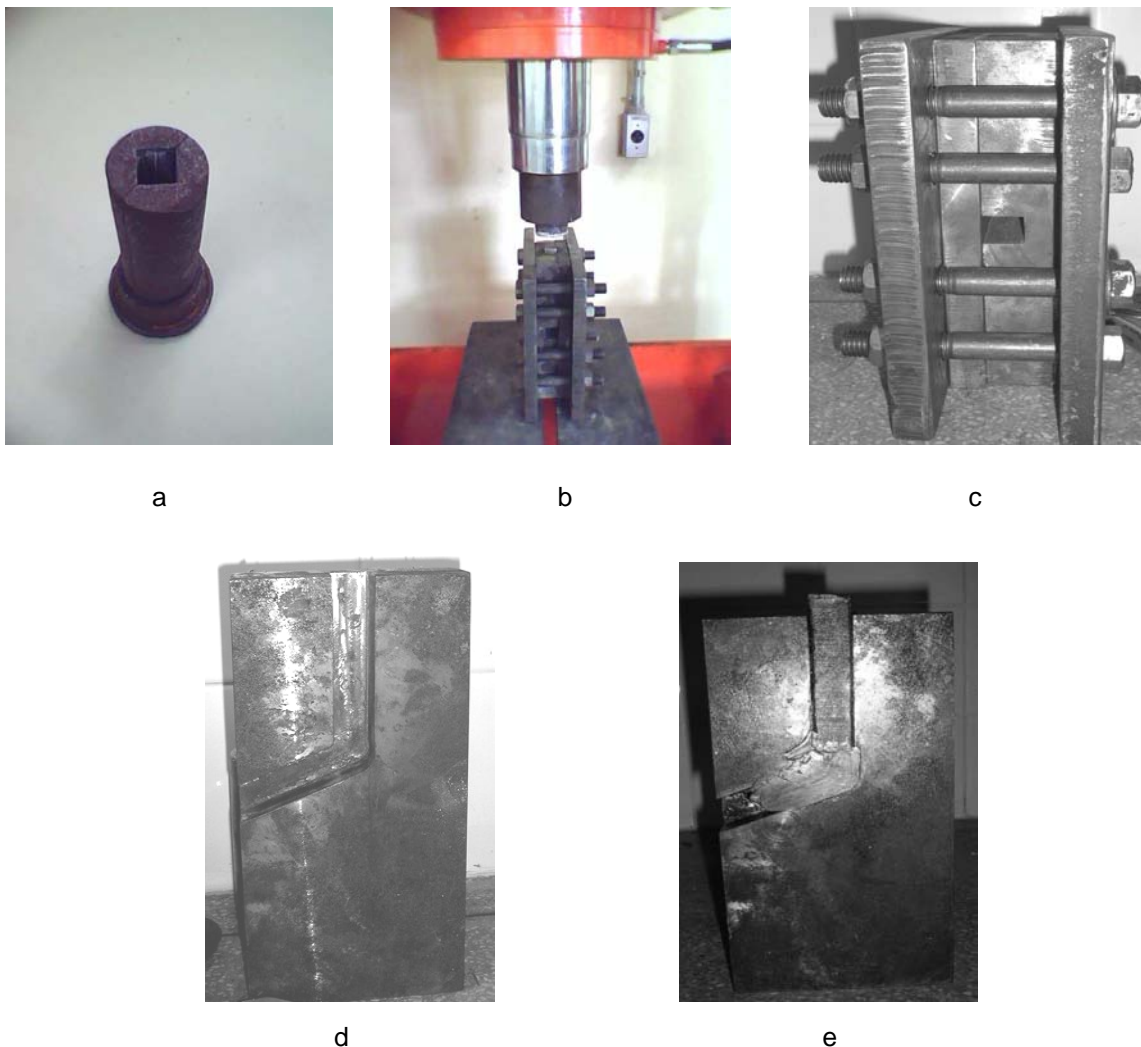


Figura 1: a) Preparação do corpo de prova. b) Sistema de prensagem. c) Matriz de prensagem. d) Canal de prensagem. e) Prensagem angular com corpo de prova e punção acoplados.

### 3 RESULTADOS

Os resultados numéricos estão exibidos na figura 2, mostrando a evolução da tensão efetiva durante o processo ECAP.

A Figura 3 mostra a macroestrutura da peça processada.

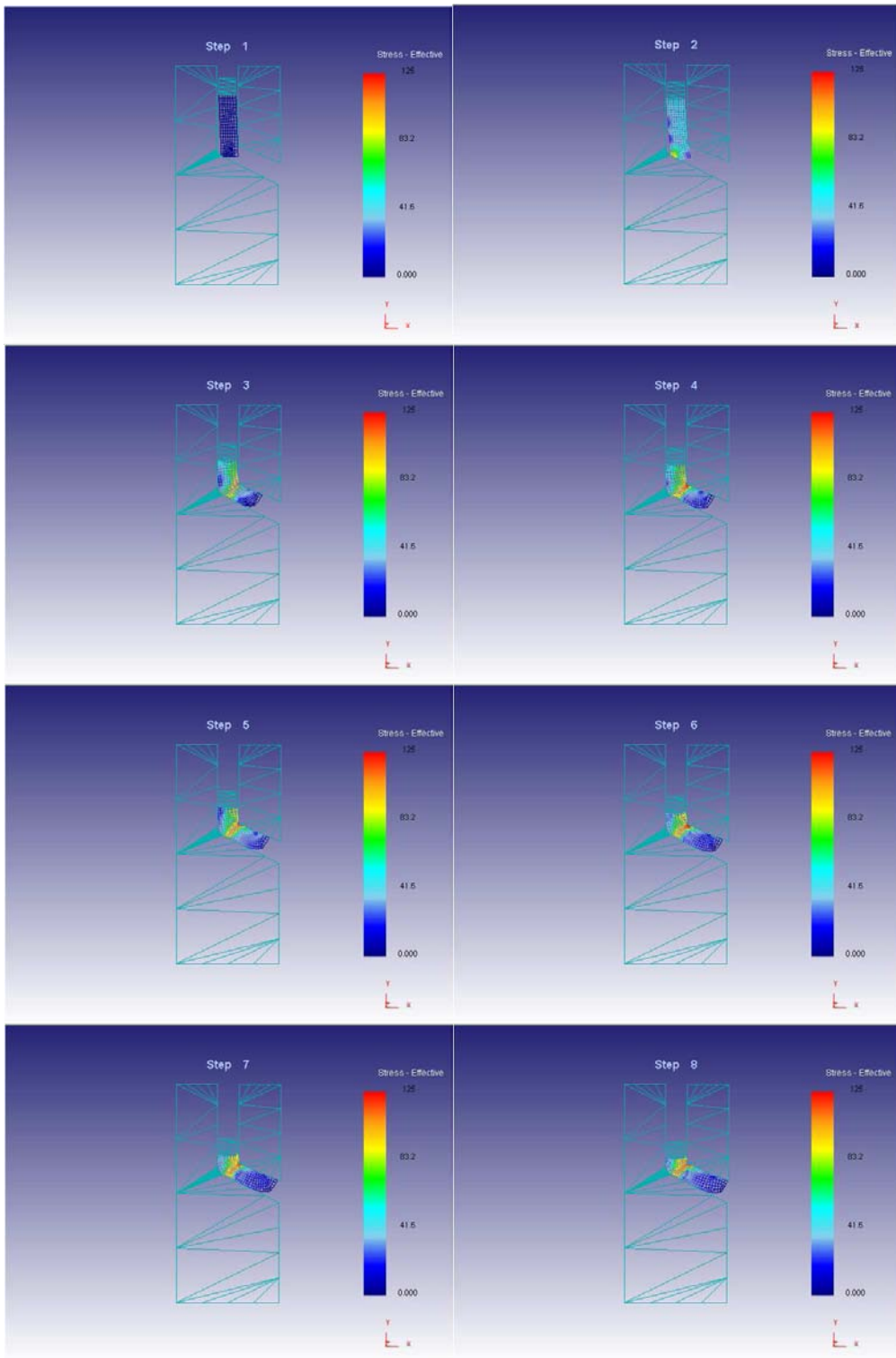


Figura 2: Simulação do processo de ECAP.



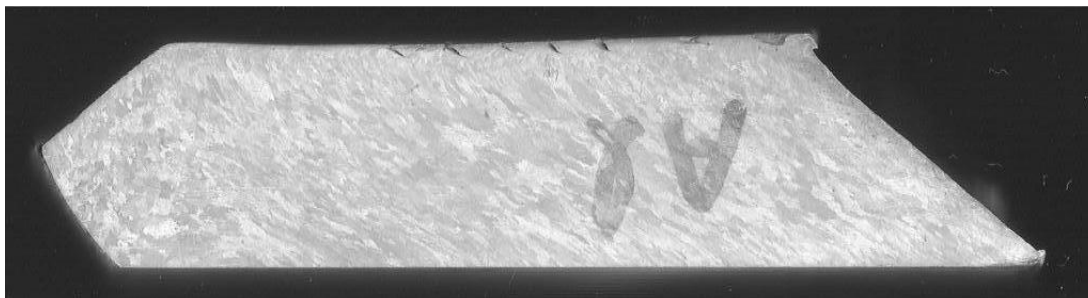


Figura 3: Macroestrutura do Al processado por ECAP.

#### 4 DISCUSSÃO

Nos dois primeiros quadros da figura 1 podemos observar que a ponta da peça não sofre uma tensão efetiva durante o processo de ECAP, o que explica a não deformação da estrutura na ponta do corpo de prova. Um refinamento menos intenso da estrutura é definido pela literatura como parte não útil da peça, o que pode ser melhorado pela continuação do processo realizando outros passes de ECAP, sendo de 6 a 12 o número otimizado de passes para as ligas de Al, esse fenômeno é definido como efeito de ponta.

É observada também ao longo do processo a distribuição irregular da tensão acarretando uma distribuição não homogênea da deformação, também sendo evidenciados na macrografia grãos deformados de uma ponta a outra da peça.

Resultados experimentais de microdureza obtidos por Araújo et al.<sup>(2)</sup> mostraram um perfil de dureza irregular obtendo valores mais altos próximos à superfície, pois além da tensão aplicada no processo há, nesta região, um acréscimo devido ao atrito entre as superfícies dos materiais.

#### 5 CONCLUSÃO

O estudo numérico do processo ECAP possibilita a previsão do comportamento do material durante o processo e viabiliza a adequação do processo. O ECAP possui inúmeras vantagens em relação aos outros processos de conformação. A má distribuição da deformação é o maior problema do ECAP. A redução do atrito entre a peça e a matriz é uma das soluções da má distribuição de deformação ao longo da peça, pois algumas áreas do corpo de prova ficam mais encruadas que outras, com zonas de deformação heterogêneas, o que resulta em uma fragilização nas áreas de fronteira.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade Federal do Pará pelo incentivo aos alunos.

#### REFERÊNCIAS

- 1 MOON, B. S.; KIM, H. S.; HONG, S. I. Plastic flow and deformation homogeneity of 6061 during equal channel angular pressing. **Rev. Scripta Materialia**, v. 46, p. 131-136, 2002.
- 2 ARAÚJO, J. S.; SOUZA, A. P.; SIQUEIRA, C. A.; COSTA, A. L. M. Prensagem angular de ligas de alumínio solidificadas unidirecionalmente, Porto de Galinhas. Pernambuco: **CBEcimat**, 2008.
- 3 RAAB, G. I. Plastic flow at equal channel angular pressing in parallel channels. **Rev. Materials Science & Engineering**, p. 230-233, may. 2005.

- 4 ANTUNES, B. R.; DUDA, F. P.; BLAS, J. C. G.; PEREIRA, L. C. Análise por elementos finitos do processo de extrusão angular em canal do alumínio de pureza comercial, Foz do Iguaçu. Paraná: **CBEcimat**, 2006.
- 5 KIM, H.S.; HONG, S.I.; LEE, Y.S., Finite element analysis of equal channel angular pressing of strain rate sensitive metals. **Journal of Materials Processing Technology**, Daejeon, South Korea, v.130-131, n.20, p. 497-503, 2002.
- 6 ZHAO, W.J.; DING, H.; REN, Y.P.; HAO, S.M.; WANG, J.; WANG, J.T. Finite element simulation of deformation behavior of pure aluminum during equal channel angular pressing. **Materials Science and Engineering: A**, Shenyang, China, v. 410-411, n.25, p. 348-352, 2005.