

# PROCESSAMENTO POR EXTRUSÃO ANGULAR EM CANAIS IGUAIS (EACI) DE UMA LIGA DE ALUMÍNIO<sup>1</sup>

Roberto Braga Figueiredo<sup>2</sup>  
André Luíz de Moraes Costa<sup>3</sup>  
Margareth Spangler Andrade<sup>4</sup>  
Maria Teresa Paulino Aguilár<sup>5</sup>  
Paulo Roberto Cetlin<sup>6</sup>

## Resumo

Uma nova técnica de refino de grão de metais até a escala submicrométrica ou nanométrica através da aplicação de deformações plásticas intensas, a Extrusão Angular em Canais Iguais (EACI), foi aplicada a uma liga de alumínio comercial. Foram realizados 2 passes através de uma matriz com ângulo entre canais de 90° com sucesso. No terceiro passe constatou-se a ocorrência de instabilidade plástica e concentração da deformação em bandas. Ensaios de tração e testes de microdureza mostraram que a resistência do material aumentou significativamente e que o alongamento percentual diminuiu. A análise metalográfica revelou que a estrutura de grãos adquire uma orientação característica do processo e constatou-se a formação de bandas de cisalhamento.

**Palavras-chave:** EACI; ECAP; Deformação plástica intensa; Propriedades mecânicas.

<sup>1</sup> Contribuição técnica a ser apresentada no 60º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 25 a 28 de julho de 2005, Belo Horizonte-MG

<sup>2</sup> Engenheiro Mecânico, Aluno de Mestrado do Curso de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Escola de Engenharia-UFMG, Belo Horizonte-MG. robertofigueiredo@terra.com.br

<sup>3</sup> Dr., Pesquisador, Instituto Milênio de Nanociências-CNPq; Setor de Tecnologia Metalúrgica da Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais-CETEC, Belo Horizonte-MG. andre.costa@cetec.br

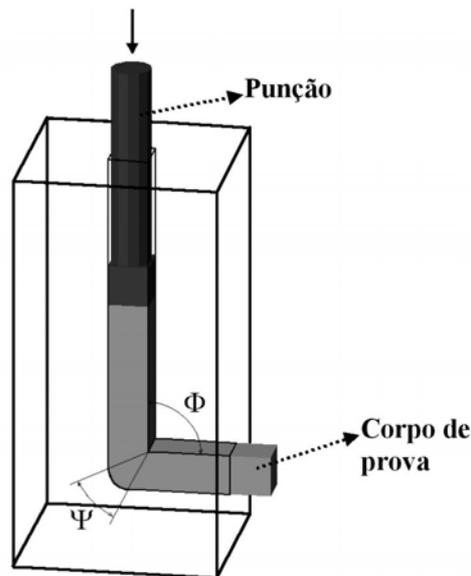
<sup>4</sup> Dr., Pesquisador Pleno do Setor de Tecnologia Metalúrgica da Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais-CETEC, Belo Horizonte-MG. margareth.spangler@cetec.br

<sup>5</sup> Dr., Professor Adjunto do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, Escola de Engenharia-UFMG, Belo Horizonte-MG. teresa@demc.ufmg.br

<sup>6</sup> Dr., Professor Titular do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia-UFMG, Belo Horizonte-MG. pctlin@demet.ufmg.br

## 1 INTRODUÇÃO

Técnicas de produção de metais nanoestruturados ou com grãos ultrafinos têm sido muito estudadas devido às excelentes propriedades destes materiais, tais como resistência elevada e capacidade de conformação superplástica sob elevada taxa de deformação<sup>(1,2,3,4)</sup>. Dentre as técnicas em estudo, as de deformação plástica intensa são as que apresentam maior potencial de aplicação para produção em larga escala, especialmente a Extrusão Angular em Canais Iguais-EACI (*Equal Channel Angular Pressing-ECAP*), devido à capacidade de fabricação de peças com volume adequado e livre de defeitos internos; além disto alguns pesquisadores realizaram modificações no processo para produção contínua<sup>(5,6,7)</sup>. Neste processo um corpo de prova é forçado a passar por uma matriz constituída por 2 canais de seção transversal igual que se interceptam formando um ângulo  $\Phi$  como mostra a Figura 1. A interseção entre os dois canais pode conter uma curvatura externa para facilitar a extrusão do material, caracterizada pelo ângulo  $\Psi$  que é formado pelos segmentos de reta que unem o ponto interno da interseção entre os canais com o início e o término da curvatura. Durante o processo o material sofre cisalhamento na interseção entre os canais, sendo que a quantidade de deformação efetiva aplicada é função dos ângulos  $\Phi$  e  $\Psi$  e pode ser determinada pela equação 1<sup>(8)</sup>.



**Figura 1.** Ilustração esquemática do processo de Extrusão Angular em Canais Iguais.

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[ 2 \cot \left( \frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) + \Psi \operatorname{cosec} \left( \frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) \right] \quad (1)$$

Como a seção transversal da peça não se altera após a deformação, o processo pode ser repetido diversas vezes e a quantidade de deformação imposta ao material pode atingir qualquer nível, possibilitando o refinamento da sua estrutura. Apesar dos metais produzidos através desta técnica apresentarem grãos com algumas centenas de nanometro (o que os caracteriza como grãos ultrafinos) alguns

pesquisadores os consideram nanoestruturados pois estes grãos apresentam subestruturas menores do que 100nm como indicam análises de raio-X<sup>(9,10)</sup>.

Uma vez que o processo de EACI não conta com qualquer desenvolvimento apreciável no Brasil, este trabalho procura apresentar as características (a) do processo aplicado a uma liga de alumínio comercial e (b) do material produzido. O alumínio não apresenta elevada resistência, o que facilita a extrusão e, além disto, existem diversos trabalhos em periódicos internacionais relativos ao processamento do alumínio por EACI o que possibilita comparações dos resultados.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

O material utilizado nos trabalhos foi o alumínio comercialmente puro. O material foi adquirido na forma de barras com seção quadrada de 5/8 polegadas (15,6mm) de aresta.

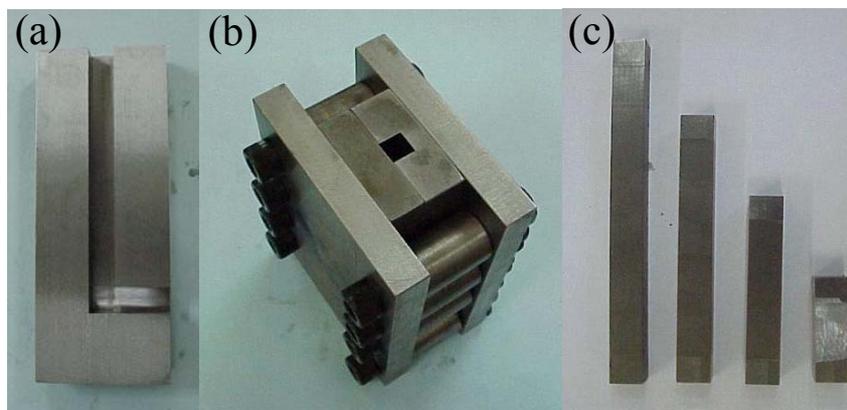
A análise química do material revelou a seguinte composição:

**Tabela 1.** Composição química do alumínio (% em peso).

Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Zn
0,636	0,137	1,34	0,111	0,086	0,435

Para minimizar o efeito do processamento anterior do material, foi feito o recozimento em forno de mufla a 440°C por 90min seguido de resfriamento dentro do forno.

Uma matriz foi especialmente projetada e construída para a realização do EACI. Em uma placa foram usinados dois canais de seção transversal quadrada com aresta de 16mm que se interceptavam em um ângulo de 90° sem curvatura externa (Figura 2a). Outra placa foi utilizada para fechar o canal e um aparato constituído de duas placas e 8 parafusos de elevada resistência foi utilizado para fechar a matriz (Figura 2b). Foram construídos 4 punções com comprimentos variados para evitar problemas de flambagem (Figura 2c). Todas as peças foram construídas em aço ABNT 1045 temperado e revenido.



**Figura 2.** Aparato utilizado para realização de EACI: (a) placa contendo os canais de extrusão, (b) matriz completa fechada e (c) punções de comprimentos variados.

Os processamentos por EACI foram realizados numa máquina de compressão KRATOS com capacidade de 50ton, à temperatura ambiente, utilizando lubrificante

de bissulfeto de molibdênio e com velocidade do punção de aproximadamente 20mm/min. Os ensaios foram interrompidos diversas vezes para troca dos punções e lubrificação. Devido à expansão elástica dos corpos de prova após o processamento foi necessário usiná-los em uma plaina, entre os passes, para facilitar a sua reinserção na matriz. Foram utilizadas duas rotas de processamento através da rotação do corpo de prova entre os passes de EACI. Para o estudo do alinhamento da estrutura foi utilizada a rota de processamento conhecida como rota A, em que o corpo de prova não sofre rotação entre os passes, e para a análise das propriedades mecânicas foi utilizada a rota de processamento B<sub>C</sub>, em que o corpo de prova é rotacionado 90° no mesmo sentido entre os passes. A rota B<sub>C</sub> é conhecida por apresentar a mais rápida evolução da estrutura do material.

As medidas de microdureza Vickers foram realizadas em uma máquina de microdureza FUTURE TECH FM-700 com 300gf de carga e 10s de tempo de aplicação. As medidas de microdureza para caracterizar as regiões dentro da banda de cisalhamento e fora dela, na amostra processada em 3 passes de EACI, foram feitas com carga de 50gf para que o tamanho da indentação fosse menor.

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina de ensaios universal INSTRON modelo 5582. Os corpos de prova possuíam comprimento útil de 50mm e diâmetro útil de 5mm. Foram feitas marcas a cada 5mm do comprimento útil e a medida de alongamento percentual foi feita de acordo com a equação 1.

$$\text{Alongamento (\%)} = (d_f - d_i)/d_i$$

Onde  $d_f$  é a distância entre 5 marcas na região da estrição após o ensaio de tração e  $d_i$  é a distância entre 5 marcas antes do ensaio de tração.

Os ensaios foram realizados com velocidade do cabeçote da máquina constante. A taxa de deformação inicial em todos os ensaios foi de  $6,67 \cdot 10^{-4}$ /s. Os dados de carga foram determinados por uma célula de carga com capacidade nominal de 100kN e os dados de extensão do corpo de prova foram determinados por um extensômetro eletrônico com 25mm de comprimento útil. Após a estrição foram feitas medidas diretas do diâmetro mínimo da região da estrição. Os valores de carga e extensão do corpo de prova foram utilizados nos cálculos de tensão verdadeira e deformação verdadeira até o ponto em que a estrição iniciou-se; a partir deste ponto, foram utilizados os dados de carga e diâmetro mínimo do corpo de prova para os cálculos de tensão e deformação verdadeiras.

Foram preparadas amostras do material recozido e processado por EACI para análise microestrutural. As amostras foram retiradas de modo que fosse feita análise dos planos longitudinal, paralelo à direção axial dos corpos de prova, e transversal, perpendicular à direção axial dos corpos de prova.

Fios condutores de eletricidade foram soldados às amostras e o embutimento foi feito em resina de secagem à temperatura ambiente. Foi feito lixamento em lixas 320, 600, 800 e 1500 seguido de polimento em panos com spray de diamante (3 $\mu$ m e 1 $\mu$ m) e o polimento final foi feito em suspensão de sílica coloidal (OP-S).

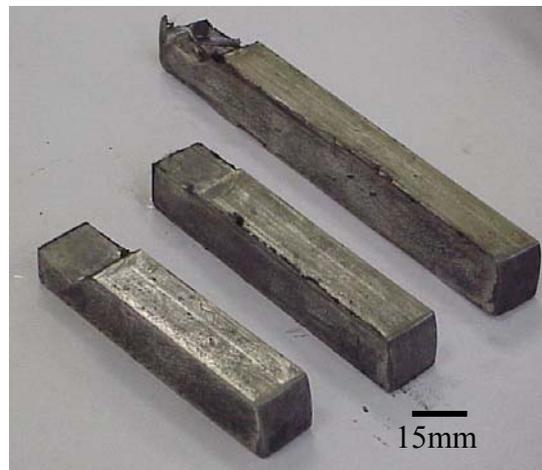
A revelação da estrutura de grãos foi feita através de ataque eletrolítico. O reagente utilizado consistia em uma mistura de 294,6ml de água destilada e 5,4ml de HBF<sub>4</sub>. A fonte para ataque eletrolítico foi regulada em 20V e o ataque durou 3 minutos sendo que a amostra foi lavada com água destilada e álcool após o ataque. Imagens da microestrutura foram feitas em um microscópio ótico utilizando-se luz polarizada.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No primeiro passe de EACI com corpos de prova de alumínio a força no pistão máxima necessária foi 8000kgf. A carga máxima necessária para o segundo passe foi 15000kgf e 20000kgf para o terceiro passe.

Observou-se um afastamento entre as duas partes da matriz provocada pela tensão gerada nos canais durante o processamento. A contenção do escoamento lateral do corpo de prova durante o processo de EACI provoca tensões nas paredes do canal de entrada. A componente destas tensões que age no sentido de separar as duas partes da matriz provoca uma força proporcional à área do corpo de prova em contato com a parede e que pode atingir valores próximos a 56000kgf em um corpo de prova com 100mm de comprimento quando a carga do pistão for de 20000kgf.

Uma pequena quantidade de material escoou pela abertura entre as duas partes da matriz provocando a formação de rebarbas no corpo de prova, que podem ser vistas na Figura 3.



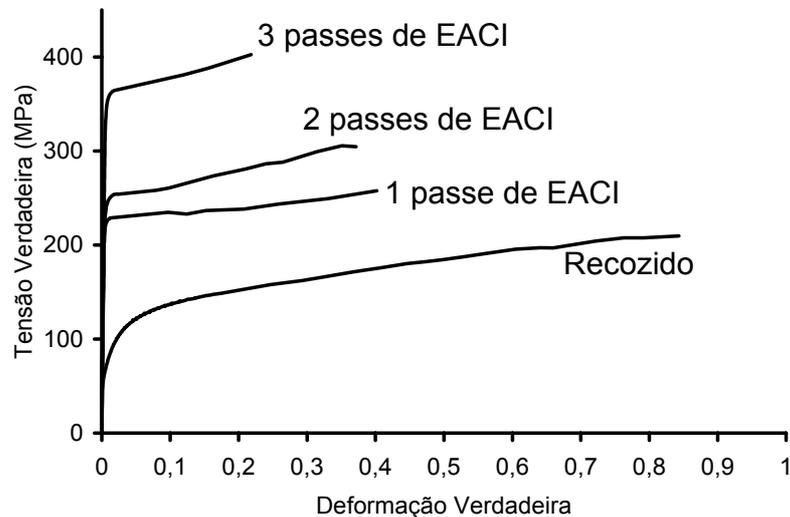
**Figura 3.** Corpos de prova processados por EACI.

Foram realizados ensaios de microdureza e de tração no material recozido e processado em 1, 2 e 3 passes de EACI seguindo-se a rota de processamento B<sub>C</sub>. Os ensaios de tração revelaram as medidas de alongamento percentual, limite de escoamento e limite de resistência, além da curva de fluxo do material. A tabela a seguir apresenta a média dos resultados obtidos nestes ensaios.

**Tabela 2.** Propriedades mecânicas do alumínio antes e depois do processamento por EACI seguindo-se a rota B<sub>C</sub>.

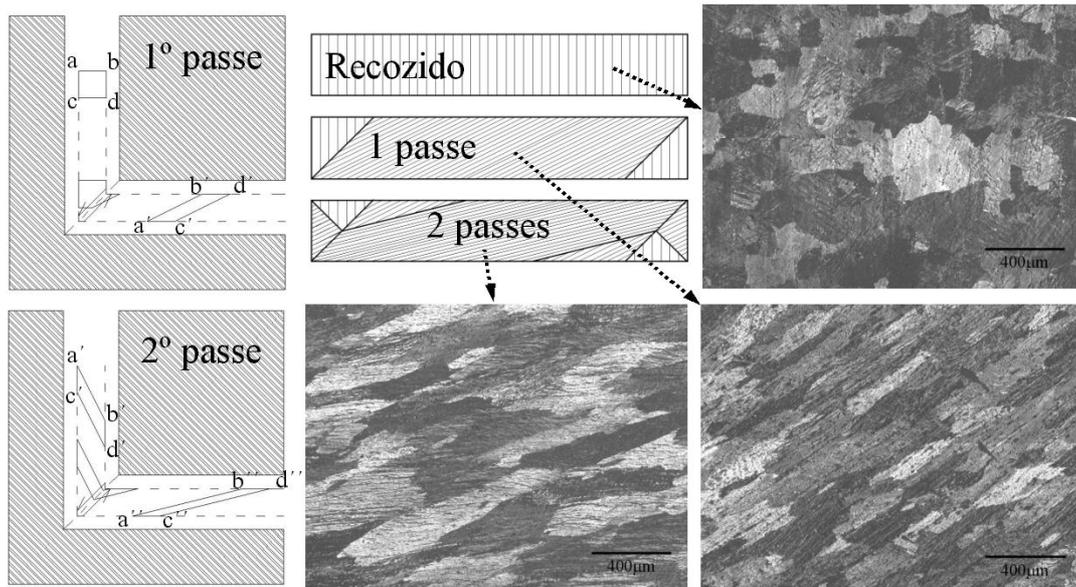
	Microdureza (HV)	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência (MPa)	Alongamento (%)
Recozido	41,3	59,6	125,5	27,7
1 passe de EACI	72,9	219	224,7	8,14
2 passes de EACI	76,9	237,2	249,6	4,68
3 passes de EACI	121,9	356	368	4,42

As curvas tensão verdadeira-deformação verdadeira são apresentadas na Figura 4. Observa-se que a capacidade de encruamento do material processado é menor se comparado com o material recozido.



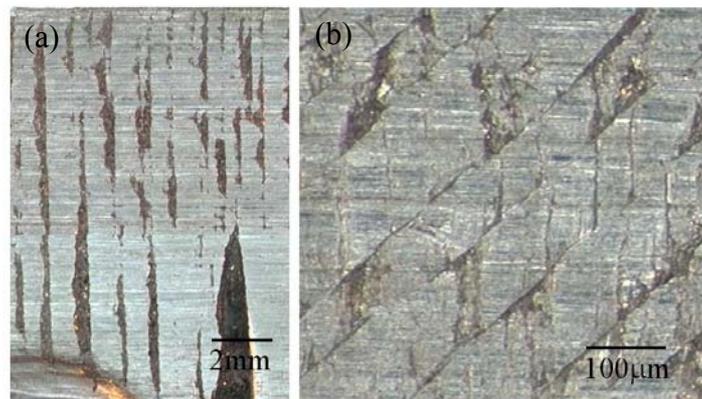
**Figura 4.** Curvas de tensão verdadeira - deformação verdadeira do alumínio recozido e processado em 1, 2 e 3 passes de EACI seguindo-se a rota de processamento B<sub>C</sub>.

A Figura 5 ilustra o cisalhamento que ocorre durante o processo e o seu efeito na orientação de um elemento de área no primeiro e no segundo passe seguindo-se a rota A. Observa-se que as linhas paralelas à direção axial, ac e bd, permanecem alinhadas com a direção axial do corpo de prova enquanto que as linhas ab e cd que estavam alinhadas perpendicularmente à direção axial, alinham-se em uma direção que forma um ângulo de aproximadamente 27° com a direção axial após um passe de processamento. Desta forma todo o elemento adquire uma inclinação preferencial. Este mesmo alinhamento é observado na estrutura do material após o processamento. No segundo passe o corpo de prova é inserido na matriz de extrusão sem rotação e o alinhamento do elemento de área fica mais inclinado. A Figura 5 também mostra a estrutura de grãos do material anterior e posterior ao processamento até 2 passes seguindo-se a rota A em que o corpo de prova não sofre rotação entre os passes. Observa-se que a estrutura de grãos do material adquire um alinhamento semelhante ao previsto para o elemento de área na ilustração do processo. Também é apresentada uma ilustração do alinhamento da estrutura ao longo de todo o corpo de prova e o “efeito de ponta”. Quando o processo inicia-se a porção do corpo de prova que está à frente do plano de cisalhamento não sofre deformação e mantém a orientação original. O mesmo ocorre na porção final do corpo de prova que não atinge o plano de cisalhamento ao término do processamento. Este efeito repete-se no passe seguinte e o corpo de prova fica dividido em regiões com diferentes níveis de deformação. Para evitar problemas de heterogeneidade de propriedades as pontas dos corpos de prova devem ser cortadas após cada passe de processamento.



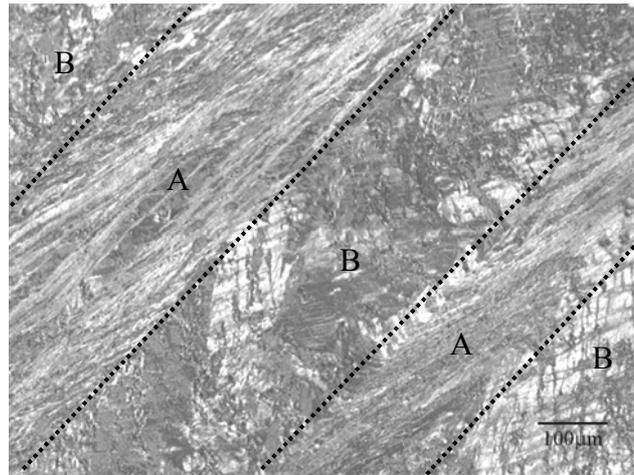
**Figura 5.** Ilustração do cisalhamento durante o processamento por EACI e das regiões com diferentes níveis de deformação no corpo de prova e imagens da microestrutura do material apresentando diferentes orientações preferenciais.

O corpo de prova processado em 3 passes apresentou fraturas na face superior e bandas de cisalhamento macroscópicas na face lateral como mostra a Figura 6.



**Figura 6.** Aspecto superficial do corpo de prova: (a) face superior do corpo de prova e (b) face lateral do corpo de prova.

A análise da microestrutura revelou a presença de diversas bandas de cisalhamento alinhadas com o plano de cisalhamento como mostra a Figura 7. As bandas de cisalhamento estão marcadas com a letra A e separadas das regiões não deformadas no terceiro passe por linhas pontilhadas para facilitar a observação.



**Figura 7.** Microestrutura do plano longitudinal do alumínio processado em 3 passes de EACI. As regiões marcadas com A são bandas de cisalhamento.

Testes de microdureza com carga inferior à utilizada para determinar os valores de dureza apresentados na Tabela 2 foram realizados nas regiões marcadas com A e com B e mostraram que a dureza das bandas de cisalhamento (regiões A) é maior do que das regiões B indicando que o nível de deformação naquelas regiões é maior. A dureza medida na região A foi 131HV e na região B 119 HV. Estes valores são diferentes dos valores apresentados na tabela 2 devido à diferença na carga do ensaio utilizada. Como as indentações deveriam ser pequenas para caracterizar as diferentes regiões foi utilizada uma carga menor.

#### **4 CONCLUSÕES**

É possível a utilização de uma matriz bi-partida para o processamento por EACI apesar de ter sido observado um afastamento entre as duas partes da matriz e formação de rebarbas no corpo de prova.

O limite de escoamento do alumínio aumentou aproximadamente 4 vezes e o limite de resistência aumentou aproximadamente 2 vezes após o processamento por 2 passes de EACI seguindo-se a rota B<sub>C</sub> de processamento. O alongamento diminuiu consideravelmente.

O processamento por EACI através da rota A produz um alinhamento da estrutura do material com exceção para as pontas do corpo de prova.

O “efeito de ponta” permanece nos passes subsequentes e regiões com diferentes níveis de deformação são formadas no corpo de prova se as pontas não forem cortadas entre os passes de processamento.

A aplicação de 3 passes de EACI através da rota B<sub>C</sub> resultou em concentração da deformação e formação de bandas de cisalhamento no corpo de prova.

#### **Agradecimentos**

Os pesquisadores agradecem ao CNPq e à CAPES pelo apoio financeiro e à BRASIAÇO Ltda pela fabricação da matriz de EACI.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 HORITA, Z., FUJINAMI, T., NEMOTO, M., LANGDON, T.G. Improvement of Mechanical Properties for Al Alloys Using Equal-Channel Angular Pressing. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 117, p. 288-292, 2001.
- 2 VALIEV, R.Z., KOZLOV, E.V., IVANOV, Y.F., LIAN, J., NAZAROV, A.A., BAUDELET, B. Deformation Behaviour of Ultra-Fine-Grained Copper. *Acta Metallurgica Materialia*, v. 42, p. 2467-2475, 1994.
- 3 VALIEV, R.Z., SALIMONENKO, D.A., TSENEV, N.K., BERBON, P.B., LANGDON, T.G. Observations of High Strain Rate Superplasticity in Commercial Aluminum Alloys with Ultrafine Grain Sizes. *Scripta Materialia*, v. 37, p. 1945-1950, 1997.
- 4 XU, C., FURUKAWA, M., HORITA, Z., LANGDON, T.G. Severe Plastic Deformation as a Processing Tool for Developing Superplastic Metals. *Journal of Alloys and Compounds*, In Press, 2004.
- 5 ZHU, Y.T., LOWE, T.C., LANGDON, T.G. Performance and Applications of Nanostructured Materials Produced by Severe Plastic Deformation. *Scripta Materialia*, v. 51, p. 825-830, 2004.
- 6 SEGAL, V.M. Engineering and Commercialization of Equal Channel Angular Extrusion (ECAE). *Materials Science and Engineering*, v. A386, p. 269-276, 2004.
- 7 RAAB, G.J., VALIEV, R.Z., LOWE, T.C., ZHU, Y.T. Continuous Processing of Ultrafine Grained Al by ECAP-Conform. *Materials Science and Engineering*, v. A382, p. 30-34, 2004.
- 8 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, n. 2, p. 143-146, 1996.
- 9 VALIEV, R.Z., ISLAMGALIEV, R.K., ALEXANDROV, I.V. Bulk Nanostructured Materials From Severe Plastic Deformation. *Progress in Materials Science*, v. 45, p. 103-189, 2000.
- 10 WANG, Y.M., MA, E. Three Strategies to Achieve Uniform Tensile Deformation in a Nanostructured Metal. *Acta Materialia*, v. 52, p. 1699-1709, 2004.
- 11 CHANG, J.Y., SHAN, A. Microstructure and Mechanical Properties of AlMgSi Alloys after Equal Channel Angular Pressing at Room Temperature. *Materials Science and Engineering*, v. A347, p. 165-170, 2003.

# EQUAL CHANNEL ANGULAR PRESSING OF AN ALUMINUM ALLOY

*Roberto Braga Figueiredo  
André Luiz de Moraes Costa  
Margareth Spangler Andrade  
Maria Teresa Paulino Aguilár  
Paulo Roberto Cetlin*

## **Abstract**

A new technique to produce ultrafine grained material by the use of severe plastic deformation, the Equal Channel Angular Pressing, was used in an aluminum alloy. Two passes through a die with 90° angle between channels and no external curvature were successfully conducted. During the third pass plastic instability and shear localization were observed. Tensile and microhardness tests showed that the material strength increased pronouncedly and the elongation to failure was reduced. Microstructural analysis showed that the grain structure reaches a characteristic orientation.

**Key-words:** ECAP; Severe plastic deformation; Mechanical properties.