

PROCESSAMENTO DO COBRE POR EACI¹

Mateus Oliveira Santos²
Roberto Braga Figueiredo³
Maria Teresa Paulino Aguilár⁴
Paulo Roberto Cetlin⁵

Resumo

A Extrusão Angular em Canais Iguais (EACI) é um método de deformação plástica severa que consiste em submeter um corpo de prova a grandes deformações por meio de sua passagem em canais de seções transversais iguais que se interceptam. Neste trabalho, barras de cobre eletrolítico foram submetidas a três passes pela rota C desta operação com o objetivo de verificar o ganho em resistência mecânica proporcionado pelo processo. A extrusão foi realizada à temperatura ambiente em uma matriz bipartida com ângulo entre canais de 90° e raio de curvatura de 0°. Amostras das seções transversais e longitudinais dos corpos de prova de EACI foram retiradas para ensaios de microdureza. Os ensaios de compressão foram realizados em corpos de prova cilíndricos usinados na direção longitudinal dos que foram submetidos à EACI. Os resultados mostraram que a extrusão angular em canais iguais conduziu ao aumento da resistência mecânica do cobre e que a microdureza do material é diferente para as seções transversal e longitudinal da barra processada.

Palavras-chave: EACI; Refino de grão; Propriedades mecânicas; Cobre

MECHANICAL PROPERTIES OF COPPER AFTER ECAP

Abstract

Equal Channel Angular Pressing (ECAP) involves the shearing of the material through two equal and intersecting channels. The present work analyses the mechanical properties of copper annealed and after multiple passes of ECAP at room temperature. Compression and microhardness tests indicate improvement on the resistance of the copper processed.

Key words: ECAP; Grain refinement; Mechanical properties; Copper.

¹ *Contribuição técnica ao 62° Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.*

² *Aluno de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais. mateusoliveirasantos@yahoo.com.br*

³ *Mestre, Bolsista de Doutorado da CAPES/University of Southern California, EUA.*

⁴ *Dr., Professor Adjunto do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, Escola de Engenharia – UFMG, Belo Horizonte – MG*

⁵ *Dr., Professor Titular do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia – UFMG, Belo Horizonte – MG.*

INTRODUÇÃO

A crescente necessidade por materiais de alta resistência mecânica leva o ser humano a procurar novos métodos para o aprimoramento dos que estão disponíveis por meio de modificações em suas estruturas. Dentro deste contexto, a EACI – Extrusão Angular em Canais Iguais (*ECAP – equal channel angular pressing*) – surgiu como um processo alternativo para se obter melhorias no comportamento mecânico dos materiais. A resposta às solicitações mecânicas de metais e ligas submetidos à EACI é conseqüência do refino de grão promovido pela imposição de deformações plásticas altíssimas⁽¹⁾. A amostra não tem suas dimensões alteradas e isto é uma grande vantagem do método, pois permite muitos passes fazendo com que a deformação do material seja acumulada⁽²⁾.

Deformações plásticas muito severas conduzem ao refino de grão porque o grau de desorientação dos subgrãos aumenta e estes evoluem para grãos com contornos de alto ângulo. Segundo Cheng *et al*⁽³⁾ durante a deformação plástica, um grão tende a se dividir em blocos com diferentes combinações de sistemas de escorregamento. Estes blocos irão girar para diferentes orientações finais, ou para a mesma orientação, mas com velocidades diferentes. Como resultado o grão é dividido em regiões com contornos de alto ângulo. Os blocos referidos são os blocos de células de deslocações.

Foi observado por diversos pesquisadores que a rota de processamento, a geometria da ferramenta, a presença de elementos de liga e a temperatura de processamento são parâmetros altamente influentes na obtenção de grãos refinados⁽⁴⁻⁸⁾. Concluiu-se que formação de uma estrutura de grãos ultrafinos é conseqüência da imposição de uma série de deformações intensas em um pequeno número de passes através da matriz e não pelo acúmulo de pequenos incrementos de deformação⁽⁶⁾. Se a temperatura de processamento aumenta, os processos de recuperação e aniquilação de deslocações dentro dos grãos são facilitados e, por conseqüência, existe maior dificuldade para a evolução microestrutural de subgrãos para grãos⁽⁴⁾. A temperatura elevada permite, em certo instante, que a quantidade de defeitos gerados seja igual à de eliminados pelos processos restauradores⁽⁹⁾. Yamashita *et al*⁽⁴⁾ mostraram que altas temperaturas de processamento conduzem ao aumento do tamanho de grão e à redução da tensão de escoamento.

À temperatura ambiente, o aumento do número de passes de EACI conduz ao aumento da resistência mecânica. Melhorias nas propriedades mecânicas de materiais processados por EACI à temperatura ambiente têm sido relatadas^(1, 2, 6, 11). Foram observadas elevações nas tensões de ruptura, de escoamento e na dureza com o aumento do número de passes de EACI no ferro ARMCO⁽²⁾, no alumínio puro e em ligas de alumínio^(1, 2, 6, 10) e no cobre⁽¹¹⁾.

O ferro ARMCO foi processado através das rotas A e C e apresentou aumento da resistência mecânica e variação da ductilidade com o aumento do número de passes de EACI à temperatura ambiente⁽²⁾. A resistência mecânica aumentou muito após os dois primeiros passes em ambas as rotas, mas tendeu à estabilização. A rota A produziu materiais mais resistentes do que a C, mas aquele processado através da rota C teve um ganho de ductilidade a partir do terceiro passe permanecendo estável até os passes seguintes.

Iwahashi *et al*⁽¹⁾ observaram que após a EACI os menores grãos se localizaram ao longo da seção longitudinal do corpo de prova. Santos *et al*⁽¹³⁾ também observou que esta seção apresentou maior microdureza Vickers e que neste local os grãos tenderam a ser menores. Figueiredo⁽¹²⁾ e Santos *et al*⁽¹³⁾ observaram distribuição de

deformação não uniforme em uma liga chumbo-antimônio e no cobre utilizando o método dos elementos finitos e uma relação entre microdureza Vickers e a deformação. Ainda em relação ao cobre, Valiev *et al*⁽¹¹⁾ verificaram que este metal com grãos mais finos (210nm), obtidos por EACI, apresentou tensão de escoamento mais alta e encruamento mais pronunciado para os primeiros estágios de deformação, aproximadamente 5%, do que aquele com granulação mais grosseira (30 μ m).

O objetivo deste trabalho é verificar, por meio de ensaios de compressão e microdureza Vickers, detalhes da variação na resistência mecânica do cobre processado em múltiplos passes de EACI.

MATERIAL E MÉTODOS

Barras cilíndricas de cobre foram utilizadas nos experimentos. Este material foi selecionado por ter boa ductilidade e resistência mecânica não muito alta, o que possibilita a execução de múltiplos passes sem que as amostras apresentem trincas e os limites de carga da prensa e da matriz sejam excedidos.

As Tabelas 1 e 2 mostram, respectivamente, os parâmetros utilizados para o recozimento e a composição química do cobre utilizado.

Tabela 1 – Parâmetros de recozimento utilizados para o cobre.

Temperatura	Tempo
570°C	5400s

Tabela 2 – Composição química do cobre (% em peso).

Elemento	Sn	Pb	Fe	Zn	Ni	Al	Mg
%	0,010	0,018	0,010	0,012	0,005	0,049	0,007

EACI – A extrusão angular em canais iguais foi realizada à temperatura ambiente com uma matriz bipartida de aço e uma máquina compressão Kratos. A matriz possui dois canais de seções transversais quadradas e arestas de 16mm, formando um ângulo de 90° entre si e raio de curvatura de 0°. O material foi colocado no canal e empurrado com a ajuda de punções de diferentes tamanhos e tanto estes quanto os corpos de prova foram lubrificados com bissulfeto de molibdênio. A amostra foi rotacionada em 180° entre passes, caracterizando a rota C de processamento. As Figuras 1 e 2 mostram detalhes da matriz utilizada.

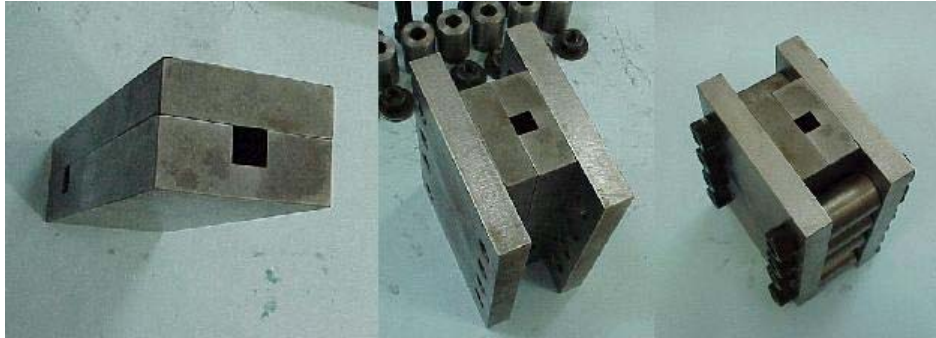


Figura 1 – Etapas de montagem da matriz.

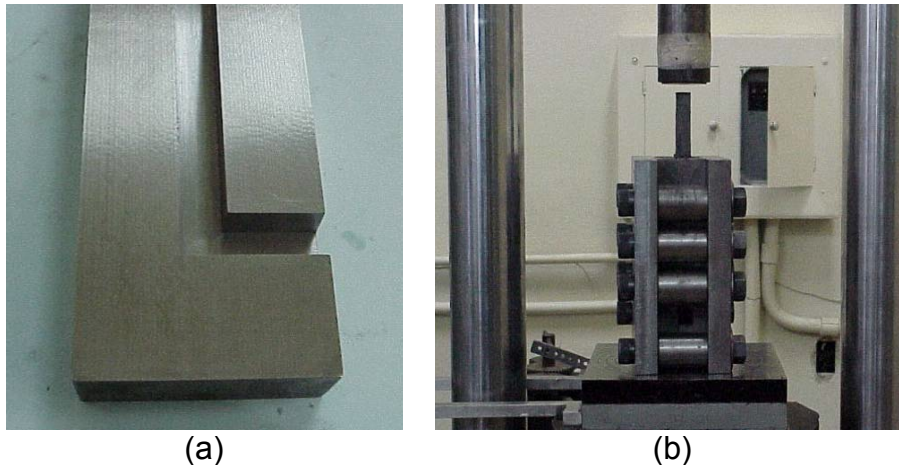


Figura 2 – (a) Canal da matriz de EACI; (b) matriz posicionada na máquina Kratos.

Como as barras utilizadas eram cilíndricas, um passe preliminar de EACI foi necessário para se obter corpos de prova com seção transversal quadrangular. Em seguida, estas amostras foram usinadas, para tirar rebarbas, e recozidas.

Ensaio de Compressão – Estes testes foram conduzidos à temperatura ambiente em amostras cilíndricas com 15mm de altura e 10mm de comprimento usinadas nos corpos de prova recozido e processados. A usinagem foi feita de forma que a direção longitudinal do cp de EACI ficasse perpendicular à base do cp cilíndrico para compressão. A figura 3 mostra o processo de EACI com a localização da direção de extrusão. Foi utilizada uma máquina Instron, modelo 5582, com controlador Merlin. A lubrificação foi feita com Molykote e a velocidade de descida do cabeçote foi de 0,0141mm/s.

Ensaio de Microdureza – Para medir a resistência à penetração utilizou-se uma máquina Leitz-Wetzlar Nr 786 com penetrador Vickers e carga de 300gf e tempo de 35 segundos. As impressões foram feitas em amostras de seção quadrada com 16mm de aresta, como as de EACI, retiradas nas direções transversais e longitudinais dos corpos de prova recozido e processados. O corte foi realizado com uma *cut off* e o embutimento foi feito a frio. A porção inferior destas amostras foi referida como zero e a superior como 16mm. A figura 3 mostra o processo de EACI, as coordenadas e uma seção utilizada para as medições de microdureza. A direção longitudinal do corpo de prova é definida como a normal ao plano xy e a transversal ao plano yz. Todas as amostras foram retiradas a distâncias de pelo menos 20mm da região onde os canais se interceptam.

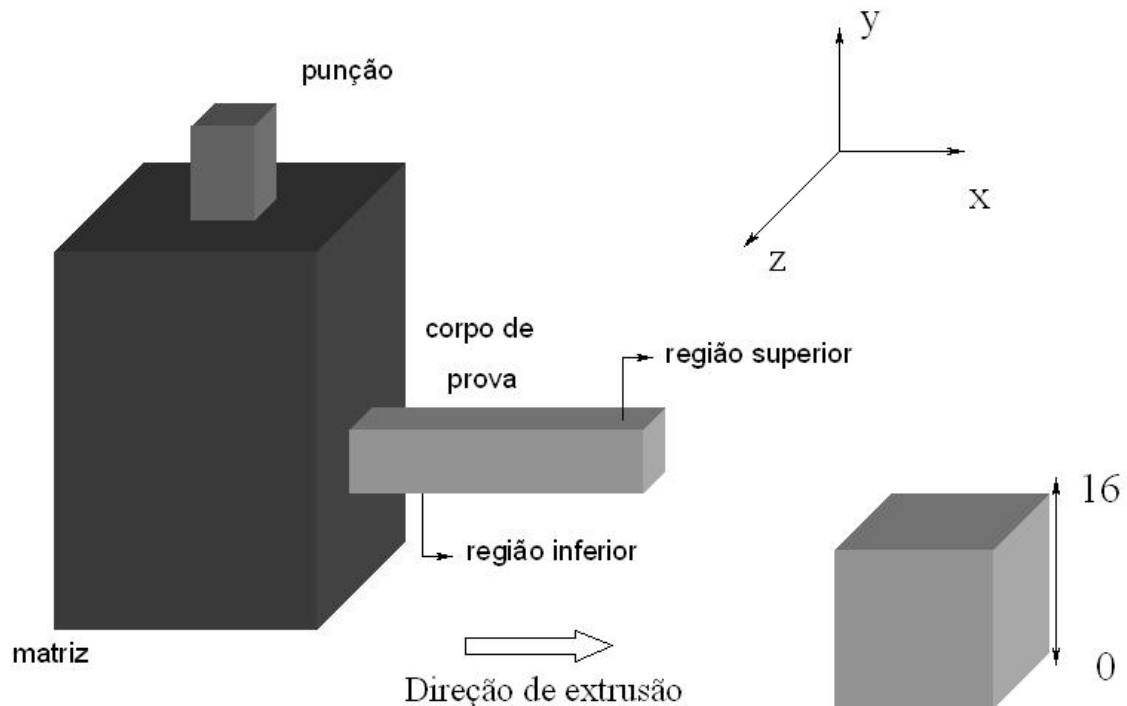


Figura 3 – Ilustração da EACI e amostra utilizada para as medições de microdureza Vickers.

Em todas as amostras as impressões foram na direção do eixo y, ou seja, partindo da porção inferior (0mm) em direção à superior (16mm), com distância de 2mm entre cada uma delas e repetição deste procedimento por mais duas vezes, mas com variação da posição em x, para a amostra da direção longitudinal, e em z, para aquela da seção transversal. Esta variação foi aleatória para a seção longitudinal, por ser de difícil controle. Para a outra, o conjunto de medições na direção em y, foi feito para distâncias de 4mm da margem direita, 4mm da esquerda e na região central.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram realizados três passes de EACI e a comparação entre as propriedades mecânicas das amostras recozidas e após o primeiro e o terceiro passes será discutida abaixo.

EACI – O valor de carga no processo de EACI cresceu até um valor máximo e, a partir deste, caiu e permaneceu aproximadamente constante até o fim. No início do processo existem folgas entre o punção e o corpo de prova e entre este e a matriz de forma que não existe resistência à movimentação do cabeçote da máquina de compressão. Quando estas folgas cessaram, a amostra se deformou por compressão até que sua seção transversal se igualasse à do canal. Quando as paredes da matriz restringiram totalmente a deformação por compressão iniciou-se o cisalhamento do material na região de intercessão dos canais. A carga máxima observada ocorreu para iniciar este cisalhamento. Em seguida, a carga abaixou e permaneceu relativamente constante até o fim do processo de cisalhamento. A carga máxima média observada em cada passe está ilustrada na Tabela 3.

Tabela 3 – Carga máxima observada para a EACI em múltiplos passes

Amostra	1 passe				2 passes				3 passes			
	140	143	140	142	184	174	170	172	190	192	194	182
Carga (kN)												

Não houve trincas nas amostras, mas após cada passe elas apresentaram rebarbas. Estas ocorreram porque as cargas eram muito altas e a matriz bipartida cedeu de forma bem discreta na região onde as duas partes se tocam, deixando uma pequena abertura por onde o material escoou. Usinagem entre passes foi necessária para retirar estas rebarbas. A Figura 4 mostra corpos de prova antes e após a EACI.

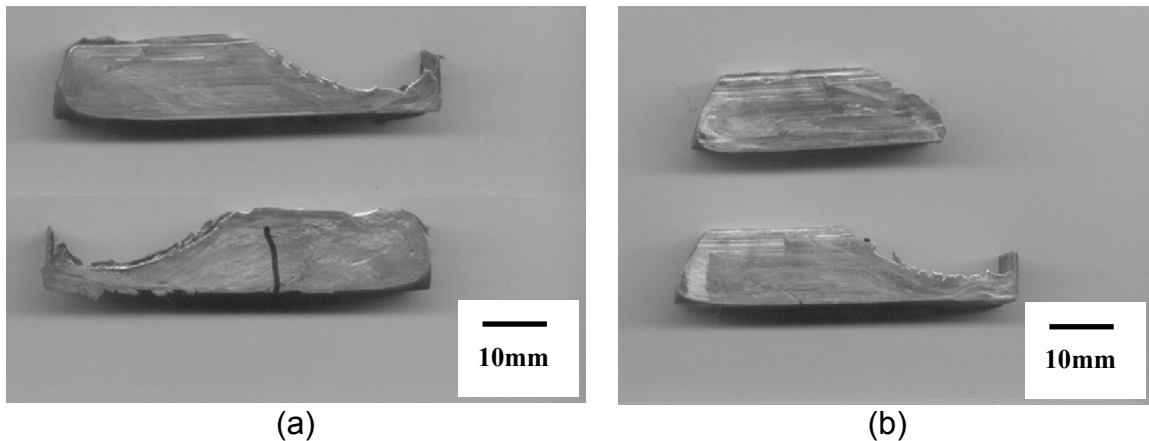


Figura 4 – Corpos de prova após EACI: (a) 1 e 2 passes; (b) 3 passes.

Ensaio de Compressão – A Figura 5 mostra as curvas tensão-deformação convencionais construídas para o cobre recozido e após 1 e 3 passes de EACI. Os corpos de prova processados por EACI mostraram maior resistência à compressão do que o recozido. A variação entre a resistência do material recozido e após um passe de EACI é maior do que a deste e após três passes.

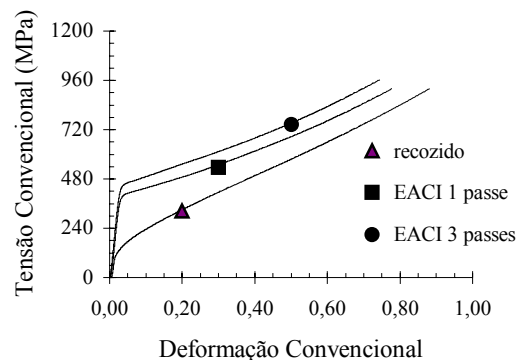


Figura 5 – Curva tensão x deformação convencionais para o cobre recozido e após 1 e 3 passes de EACI.

Ensaio de Microdureza – Após medidas as impressões de microdureza em amostras das seções transversais e longitudinais, construíram-se os gráficos das figuras 6 e 7. Na figura 6(a) está um gráfico exibindo medidas em pontos aleatórios ao longo da direção y para a seção longitudinal. Na figura 6(b), para a seção transversal, estes pontos foram levantados de forma mais controlada, pois além da

localização em y, procurou-se determinar a localização em z, que variou, em relação à margem esquerda, de 4, 8 e 12mm.

Houve tendência de aumento na resistência à penetração com o aumento do número de passes de EACI nas duas seções avaliadas. Três passes de EACI fizeram com que o cobre ficasse mais duro, mas a variação da microdureza entre o primeiro passe e o terceiro foi menor do que a variação entre este e o recozido. Outra tendência observada foi a de que, após a extrusão, a microdureza, além de aumentar, apresentou distribuição mais heterogênea do que no material recozido. Esta tendência também foi observada tanto nas amostras da direção transversal quanto nas da longitudinal à direção de extrusão. Tal heterogeneidade indica que a deformação também varia ao longo da seção. Outra tendência importante indicada pela figura 6 é que a resistência à penetração após a EACI foi maior na seção longitudinal do que na transversal. O ganho de resistência entre o primeiro e terceiro passe também foi maior nesta seção, ou seja, os valores de microdureza do cobre após o primeiro e o terceiro passes na seção transversal ficaram mais próximos. Além disso, após o terceiro passe os valores de microdureza ficaram mais estáveis, não tanto como no cobre recozido, mas com distribuição mais homogênea do que no primeiro passe.

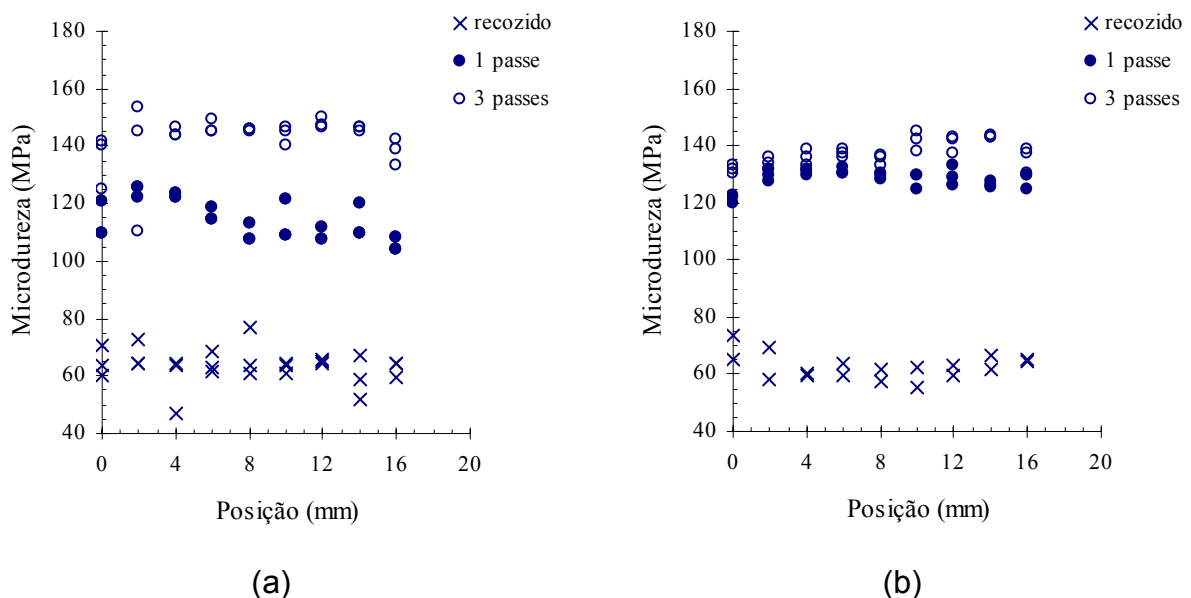


Figura 6 – Microdureza do cobre recozido e após o processamento por EACI em amostras das seções: (a) longitudinal; (b) transversal.

Na seção transversal, fez-se uma tentativa de se controlar a localização dos pontos onde seriam feitas as medidas de microdureza. Nesta seção as medidas se localizaram na direção y (0 a 16) e na z (0, 4 e 16). Isto pode servir como dado comparativo se for assumindo que a deformação é homogênea em qualquer seção transversal do corpo de prova. A figura 7 mostra os valores de microdureza medidos em cada ponto desta seção. Nestas fica evidente a melhoria da resistência à penetração após a EACI.

A comparação entre os dados dos ensaios de compressão e microdureza no cobre recozido e após EACI revela uma tendência de aumento da resistência mecânica com o número de passes de EACI. A heterogeneidade dos valores de microdureza nos materiais processados é um indício de que a deformação não é igual em qualquer ponto da seção. Combinando-se estes resultados obtidos com as

observações feitas por Iwahashi *et al*⁽¹⁾, Valiev *et al*⁽¹¹⁾, Figueiredo⁽¹²⁾ e Santos *et al*⁽¹³⁾ e com o fato de que o valor de microdureza apresentado pelas seções longitudinal e transversal do material recozido não sofreu alterações drásticas, comparadas uma com outra e ao longo de cada uma, a maior resistência à penetração observada nas seções longitudinais pode ser um indicativo de que nesta seção o refino de grão foi ainda maior do que na transversal.

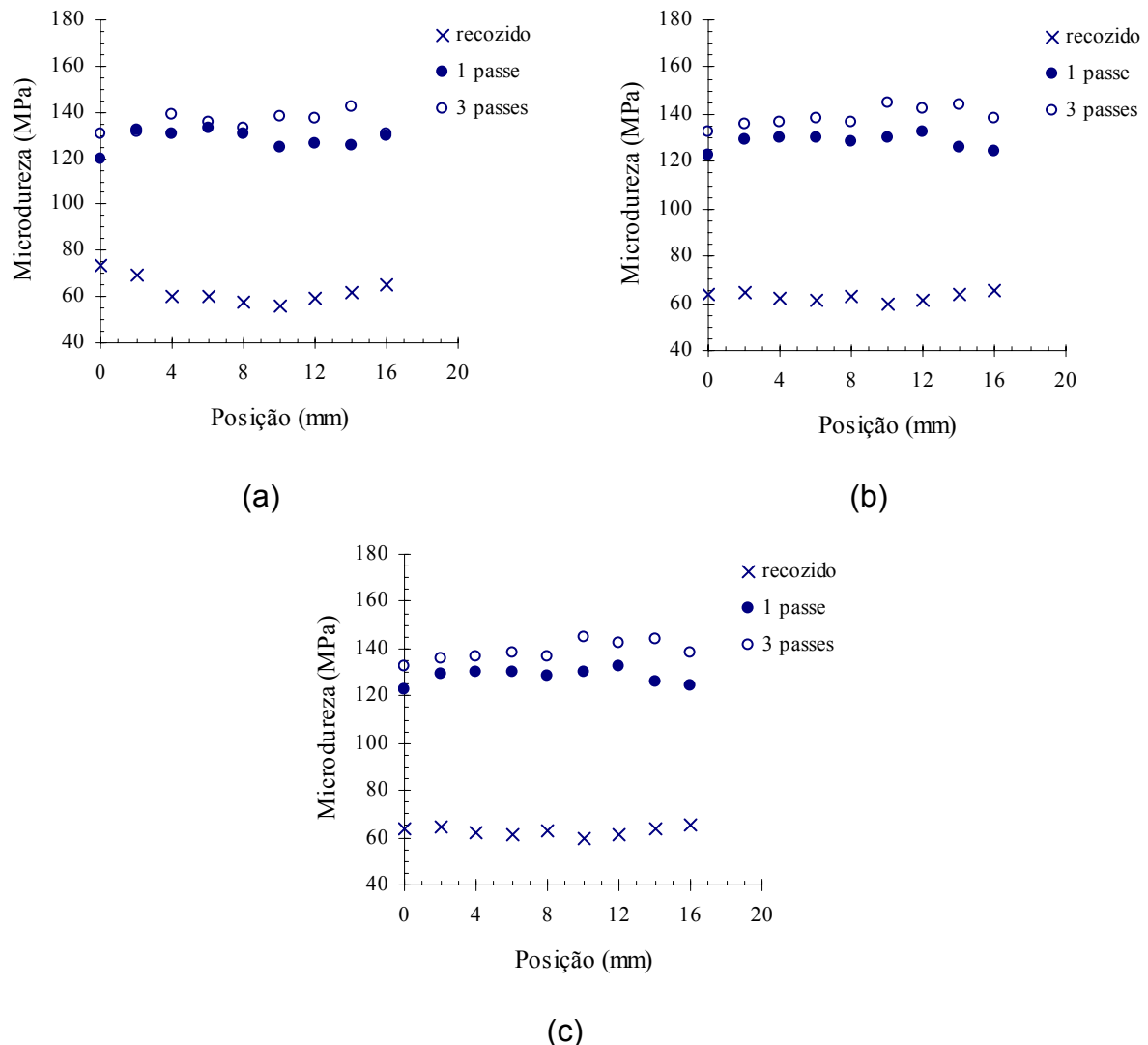


Figura 7 – Microdureza do cobre recozido e após o processamento por EACI em amostras da seção longitudinal: (a) a 4mm da margem esquerda; (b) no centro; (c) a 4mm da margem direita.

CONCLUSÕES

- Três passes de EACI aumentaram a resistência mecânica do cobre.
- A distribuição de microdureza Vickers não foi homogênea ao longo das seções transversal e longitudinal do corpo de prova de EACI, indicando distribuição de deformação heterogênea.
- A resistência à penetração da seção longitudinal foi ligeiramente superior à da seção transversal.

REFERÊNCIAS

- 1 IWAHASHI, Y. HORITA, Z. NEMOTO, M. LANGDON, T. The Process Of Grain Refinement In Equal-Channel Angular Pressing *Acta Materialia*, v. 46, Nº 9, p. 3317-3331, 1998.
- 2 SEGAL, V. M. Materials Processing By Simple Shear. *Materials Science & Engineering*, v. A 197, p. 157-164, 1995.
- 3 CHEN, Y. C. HUANG, Y. Y. CHANG, C. P., KAO, P. W. The Effect of Extrusion Temperature on the Development of Deformation Microstructures in 5052 Aluminum Alloy Processed by Equal Channel Angular Extrusion. *Acta Materialia*, v. 51, p. 2005-2015, 2003.
- 4 IAMASHITA, A. YAMAGUCHI, D. HORITA, Z. LANGDON, T. G. Influence of Pressing Temperature on Microstructural Development in Equal-Channel Angular Pressing. *Materials Science & Engineering*, v. A 287, p. 100-106, 2000.
- 5 IWAHASHI, Y. WANG, J. HORITA, Z. NEMOTO, M. Principle of Equal-Channel Angular Pressing for the Processing of Ultra-Fine Grained Materials. *Scripta Materialia*, v. 35, p. 143-146, 1996.
- 6 NAKASHIMA, K. HORITA, Z. NEMOTO, M. LANGDON, T. G. Influence of Channel Angle on the Development of Ultrafine Grains in Equal-Channel Angular Pressing. *Acta Materialia*, v. 46, p. 1589-1599, 1998.
- 7 KHAN, Z. A. CHAKKINGAL, U. VENUGOPAL, P. Analysis of Forming Loads, Microstructure Development and Mechanical Property Evolution During Equal Channel Angular Extrusion of a Commercial Grade Aluminum Alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 135, p. 59-67, 2003.
- 8 PURCEK, G. ALTAN, B.S. MISKIOGLU, I. OOI, P. H. Processing of Eutectic Zn-5%Al Alloy by Equal Channel Angular Pressing. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 148, p. 279-287, 2004.
- 9 PINHEIRO, I. P. *Torção Monotônica e Cíclica a Quente/Morno do Cobre e Aços Livres de Intersticiais (IF)*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2000. v.1, 141p. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).
- 10 KHAN, Z. A. CHAKKINGAL, U. VENUGOPAL, P. Analysis of Forming Loads, Microstructure Development and Mechanical Property Evolution During Equal Channel Angular Extrusion of a Commercial Grade Aluminum Alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 135, p. 59-67, 2003.
- 11 VALIEV, R. Z. KOSLOV, E. V. IVANOV, Y. F. LIAN, J. NAZAROV, A. A. BAUDELET, B. Deformation Behaviour of Ultra-Fine-Grained Copper. *Acta Metalurgica Materialia*, v. 42, p. 2467-2475, 1994.
- 12 FIGUEIREDO, R. B. *Processamento de uma Liga Pb-4%Sb por Extrusão Angular em Canais Iguais*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2005. 118p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).
- 13 CONGRESSO NACIONAL DA ABM, 61º, 2006, Rio de Janeiro. *Estudo da Distribuição de Deformação no Cobre Processado por Extrusão Angular em Canais Iguais*.
- 14 CORRÊA, E. C. S. *Aspectos do Encruamento de Metais Previamente Deformados a Frio*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2004. 233p. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).