

# MICRODEFORMAÇÃO SUPERFICIAL NO ALUMÍNIO E COBRE DEFORMADOS DINAMICAMENTE E ESTATICAMENTE<sup>1</sup>

Augusto Eduardo Baptista Antunes<sup>2</sup>

Lidia Mikiko Doi Antunes<sup>3</sup>

## Resumo

O comportamento a compressão de dois metais cúbicos de face centrada recozidos, alumínio e cobre, foram avaliados dinamicamente e estaticamente nas temperaturas de 77 K, 300 K e 627 K. Observações metalográficas na superfície dos corpos-de-prova permitiram avaliar quantitativamente a morfologia das bandas de deformação. Assim, revelaram-se diferenças marcantes em alta taxa de deformação. É sugerido, que as diferenças dependam da propensão do cobre para deformar-se por maclagem, enquanto o alumínio deforma-se por movimentação de discordâncias. As deformações por discordâncias e por maclagem são mecanismos competitivos. A maclagem depende de parâmetros externos (temperatura, taxa de deformação) e internos (tamanho de grão e energia da falha de empilhamento). A ocorrência da maclagem mecânica no cobre é predita como uma consequência de sua baixa energia da falha de empilhamento. O alumínio ensaiado dinamicamente a 673 K, além da movimentação transgranular das discordâncias, apresentou também bandas de deformação intergranulares, devido a deformação (ou escorregamento) entre os contornos de grão.

**Palavras-chave:** Alumínio; Cobre; Deformação dinâmica; Banda de deformação.

## SUPERFICIAL MICRODEFORMATION IN ALUMINUM AND COPPER UNDER DYNAMICALLY AND STATICALLY DEFORMATIONS

### Abstract

The compression behavior of two annealed face-centred cubic metal, aluminum and copper, has been dynamically and statically evaluated at temperatures of 77K, 300K and 627K. The metallographic surface examination of specimens permit qualitative evaluations of deformation bands morphology. This reveals distinct differences of the high strain rate deformation of these two metals. It is suggested that the differences may be related to the ability of the copper to deform by twinning, whereas the aluminum deforms by dislocation motion. Plastic deformation by slip and twinning are being competitive mechanisms. Twinning as a function of external (temperature, strain rate) and internal (grain size, stacking-fault energy) parameters. The occurrence of mechanical twinning for copper is predicted as a consequence of its low stacking-fault energy. The aluminum tested dynamically at 627K, in addition to transgranular dislocation motion, produce intergranular deformation bands by grain boundary sliding.

**Key words:** aluminum, copper, dynamic deformation, deformation band.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 11º Seminário de Metais Não Ferrosos, 1 a 3 de setembro de 2009, São Paulo, SP.

<sup>2</sup> Professor Titular, UNESP – Campus de Guaratinguetá

<sup>3</sup> MsC, IEAv – CTA

## 1 INTRODUÇÃO

A maioria dos processos de conformação de metais ocorre em alta taxa de deformação (forjamento:  $10^3\text{s}^{-1}$ ; laminação: acima de  $2 \times 10^3\text{s}^{-1}$ ; embutimento:  $10^2\text{s}^{-1}$ ; trefilação: acima de  $2 \times 10^5\text{s}^{-1}$ ; corte:  $10^3\text{s}^{-1}$  a  $10^5\text{s}^{-1}$ ).<sup>(1)</sup> Nestas altas taxas de deformação, a deformação dos materiais é produzida pela propagação de ondas elastoplásticas, denominada deformação “dinâmica”. Os materiais assim deformados têm comportamentos diferentes de quando deformados “estaticamente” nas máquinas convencionais de tração-compressão.<sup>(2)</sup> Para estudar o comportamento dos materiais deformados dinamicamente, máquinas de ensaios especiais têm sido desenvolvidas. Uma das técnicas é o emprego da “barra de pressão” ou “barra Hopkinson”.<sup>(2-4)</sup> Neste teste, a amostra é colocada entre duas barras idênticas e por meio de um impacto em um dos extremos, uma onda de choque se propaga através de todo o sistema atravessando e deformando a amostra. Estudos realizados em alumínio<sup>(3)</sup> indicam que a curva tensão-deformação dinâmica é parabólica, de maneira similar a curva estática, porém com maior nível de tensão, demonstrando uma dependência com a taxa de deformação. O cobre também apresenta uma curva dinâmica parabólica similar a curva estática, mas os níveis de tensão são menos sensíveis a taxa de deformação.<sup>(5,6)</sup> A diferença no comportamento mecânica dos materiais em alta taxa de deformação são de natureza complexa, envolvendo mecanismos especiais de movimentação de discordâncias, maclação, propagação de ondas elastoplásticas e suas interações com descontinuidades, tais como os contornos de grão. Existem vários parâmetros cristalográficos e metalúrgicos que podem afetar o comportamento dinâmico dos metais, tais como: estrutura cristalográfica, tamanho de grão, elementos de liga, precipitados, tratamentos térmicos ou mecânicos, etc. Entre eles, o presente trabalho avalia o significado da energia da falha de empilhamento,<sup>(7)</sup> uma propriedade intrínseca da estrutura cristalina de um metal, relativo a formação de bandas de deformações superficiais no alumínio e cobre deformados estaticamente e dinamicamente. Discutem-se os possíveis processos de microdeformação para tentar explicar as diferentes morfologias das superfícies.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Corpos-de-prova cilíndricos com 8 mm de comprimento e 8 mm de diâmetro foram usinados em alumínio e cobre comercialmente puros, cujas composições químicas constam nas Tabela 1 e Tabela 2.

**Tabela 1.** Composição química do alumínio empregado nos experimentos

Alumínio						
Elemento	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Residual de Impurezas
% peso	99,50	0,2	0,2	0,03	0,02	0,05

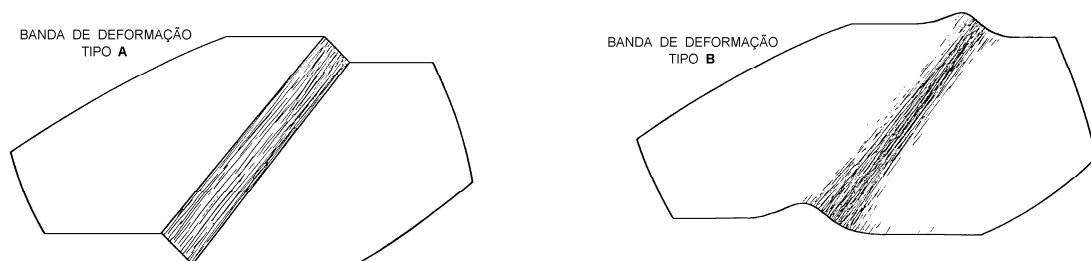
**Tabela 2.** Composição química do cobre empregado nos experimentos

Cobre				
Elemento	Cu	Ag	O	Residual de Impurezas
% peso	99,90	0,05	0,04	0,01

Após a confecção, os corpos-de-prova foram recozidos por um período de 30 minutos, os de alumínio na temperatura de 773 K, os de cobre a 1073 K, resultando em ambos os materiais um tamanho de grão da ordem de 100  $\mu\text{m}$ . Antes dos ensaios, efetuou-se o polimento eletrolítico da superfície dos corpos-de-prova, empregando-se uma solução com 1 parte de ácido nítrico e 2 partes de álcool metílico, com densidade de corrente de 2 A/cm<sup>2</sup> e potencial de 6 V. Em seguida, os corpos-de-prova foram deformados 10% sob compressão em alta taxa de deformação,  $\dot{\epsilon} = 10^3 \text{ s}^{-1}$ , numa barra de pressão e também em baixa taxa de deformação,  $\dot{\epsilon} = 5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  numa máquina convencional de ensaio tração-compressão. As temperaturas dos experimentos foram 77 K, 300 K e 673 K. Após os testes, as superfícies das amostras foram examinadas por microscopia ótica, para avaliar as diferentes características morfológicas das bandas de deformação oriundas dos diversos mecanismos de deformação plástica, em consequência das diferentes taxas de deformação e temperaturas empregadas nos experimentos.

### 3 RESULTADOS

As observações metalográficas permitiram discernir diferenças morfológicas nas bandas de deformação. Dentro dos grãos, nota-se a existência de duas formas de banda de deformação, em vista disto, para facilitar a apresentação dos resultados do trabalho, elas serão esquematicamente caracterizadas, conforme a Figura 1, em função do aspecto que apresentam nas micrografias. Uma delas, denominada do “tipo A”, a banda apresenta-se como um “degrau” na superfície do grão, são bem observadas com grande aumento. Na outra forma, “tipo B”, a banda apresenta-se como uma ondulação na superfície do grão, são melhor observadas com a luz inclinada no microscópio, em grande aumento não são bem observadas.



**Figura 1.** Esquema caracterizando as formas das bandas de deformação na superfície dos corpos-de-prova.

O cobre deformado na barra de pressão a 77 K e 300 K, apresenta bandas de deformação do tipo A, que na maioria dos casos cortam todo o grão e se propagam pelos grãos vizinhos em outras direções, formando uma banda contínua em “zig-zag” através dos grãos e suas maclas de recozimento (Figuras 2 e 3). Quando deformado na máquina convencional de ensaio a 300 K as bandas aparentam ser do tipo B finas (Figura 4), talvez uma transição do tipo A para o tipo B, porém, ainda ocorre a propagação de bandas contínuas em “zig-zag” entre os grãos. O cobre deformado na barra de pressão a 673 K apresenta bandas do tipo B com muitas distorções na superfície do grão (Figura 5).

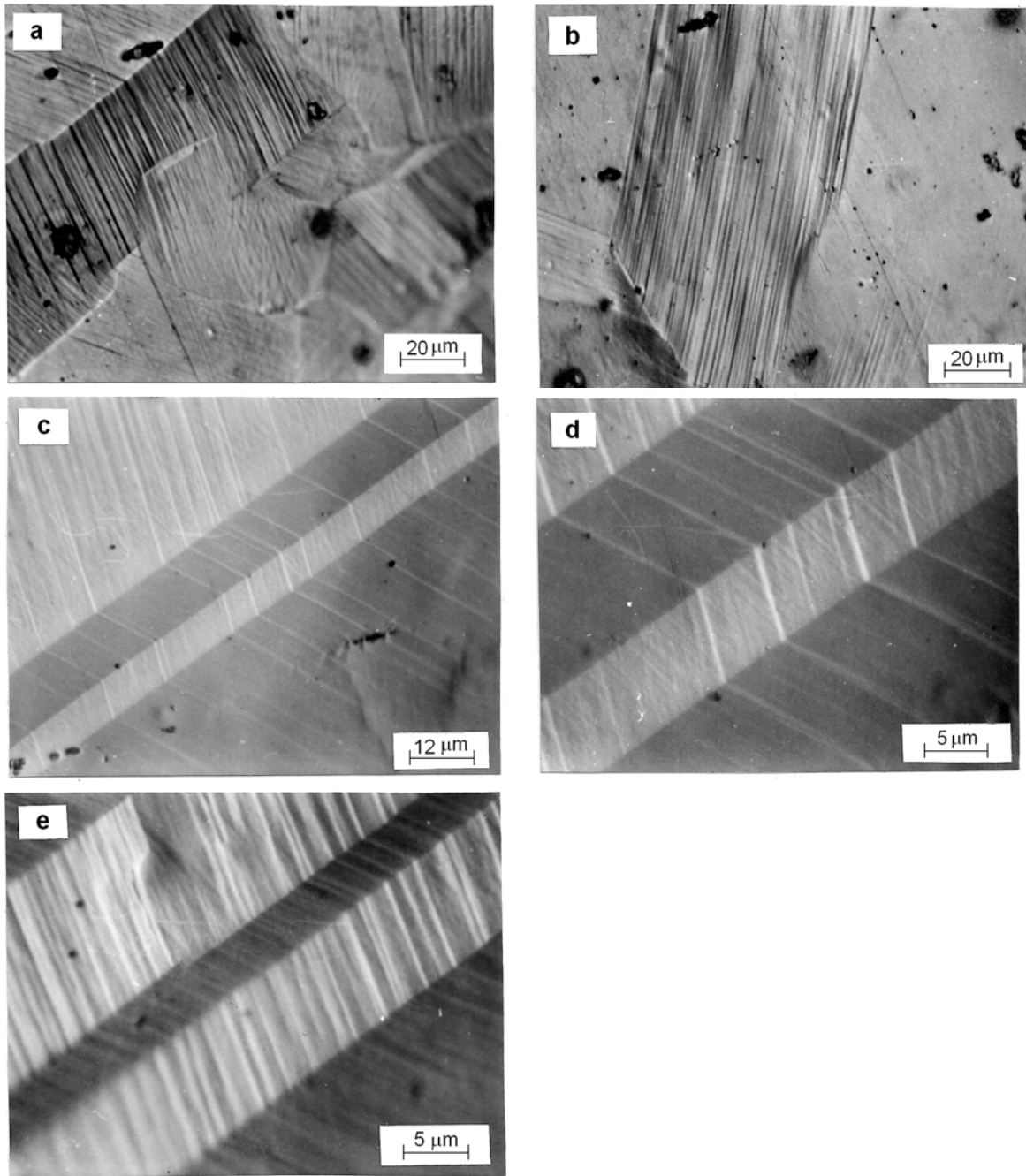
O alumínio deformado na barra de pressão a 77 K e 300 K e na máquina convencional de ensaio a 300 K apresenta bandas do tipo B (Figuras 6, 7 e 8).

Quando deformado a 673 K na barra de pressão, além de bandas do tipo B, apresenta freqüentemente distorções ou bandas de deformação paralelas aos contornos de grão (Figura 9).

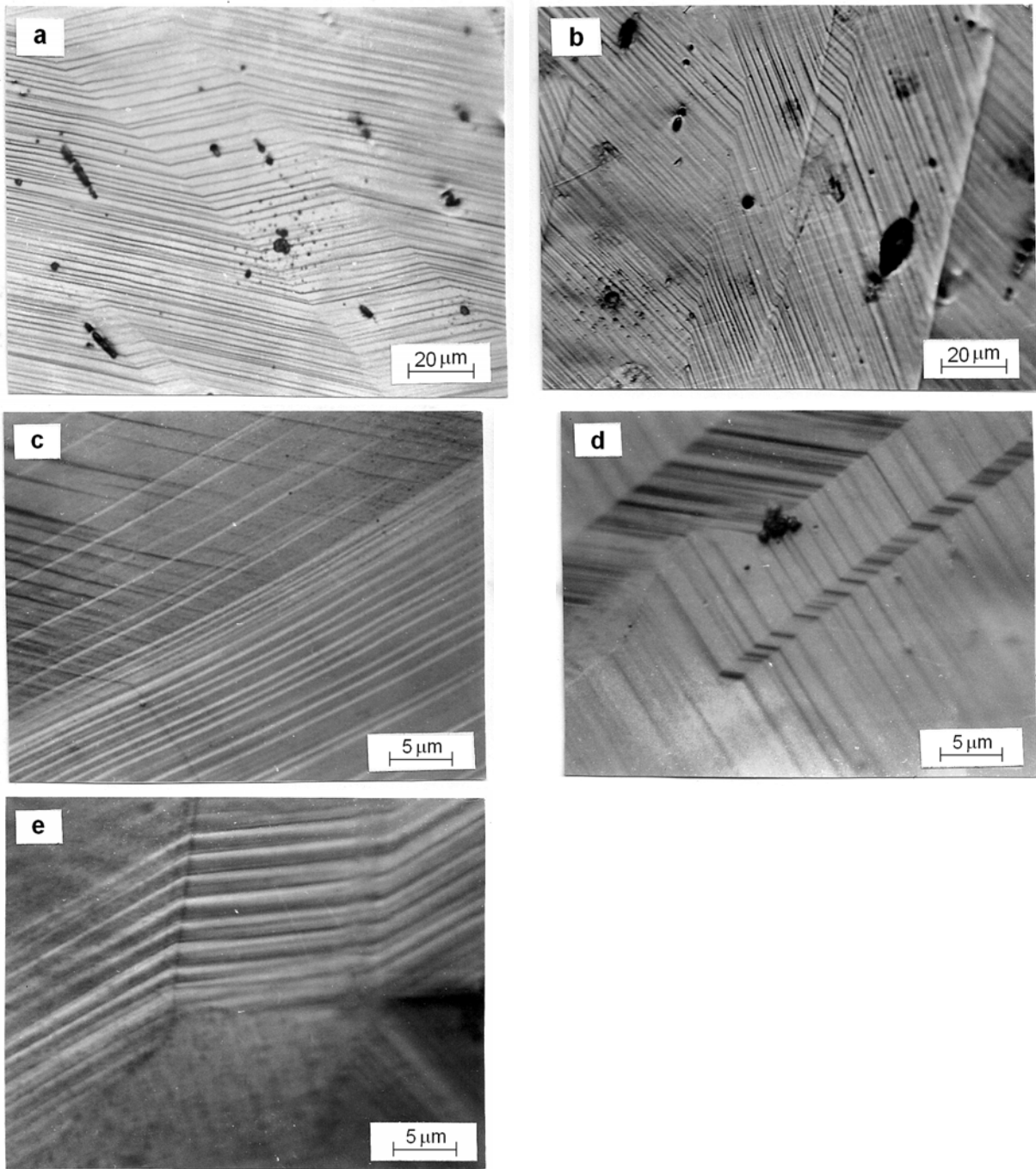
#### 4 DISCUSSÃO

É bem conhecido que a movimentação de discordâncias e a maclagem são mecanismos de deformação plástica competitivos, e que para nucleação e crescimento das maclas necessita-se da participação de discordâncias.<sup>(7)</sup> A possibilidade para a maclagem subordina-se ao fluxo plástico termicamente assistido decorrente da capacidade das discordâncias em sobrepujar os obstáculos da rede cristalina. Em vista disto, ocorre uma transição entre os referidos mecanismos, sensíveis a taxa de deformação e temperatura. Para a maioria dos metais CFC a tensão crítica para maclagem diminui quanto menor a energia da falha de empilhamento (EFE),<sup>(8)</sup> que é da ordem de duas vezes a energia de um contorno de macla de recozimento.<sup>(9)</sup> Portanto, quanto menor a EFE, maior a tendência para produzir maclas por recozimento e maclas por deformação (maclas mecânicas).

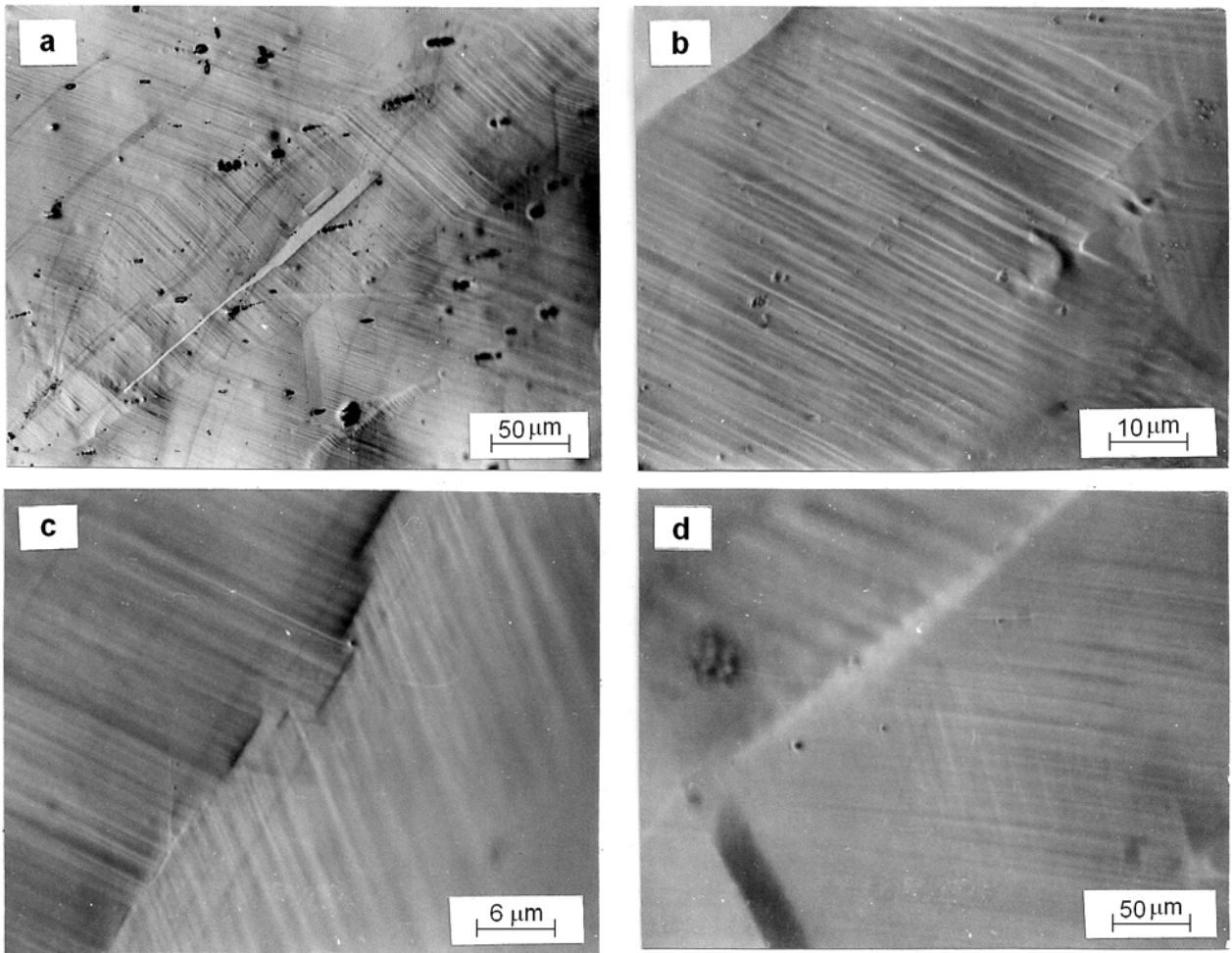
Metais com estrutura CFC tem uma alta simetria com 12 sistemas de deslizamento em potencial, logo um plano de deslizamento não terá que sofrer grandes rotações até que a tensão de cisalhamento resolvida torne-se efetiva sobre um sistema de deslizamento  $\{111\}\langle 110\rangle$ . Em vista disto, metais CFC normalmente não se deformam por maclagem, mas preferencialmente por deslizamento de discordâncias.<sup>(10,11)</sup> Todavia, metais CFC com baixa EFE, maclas mecânicas têm sido observadas quando a deformação é realizada em baixa temperatura ou com taxas de deformação elevadas.<sup>(8,11)</sup> A EFE do cobre é de  $40\text{erg/cm}^2$ , a do alumínio  $200\text{ erg/cm}^2$ .<sup>(7)</sup> Como conseqüência, maclas de recozimento são encontradas no cobre, mas não no alumínio.<sup>(9)</sup> Este comportamento pode ser também notado, pela presença de maclas de recozimento nas Figuras 2, 3 e 4 relativas ao cobre e sua ausência nas Figuras 5, 6 e 7 relativas ao alumínio.



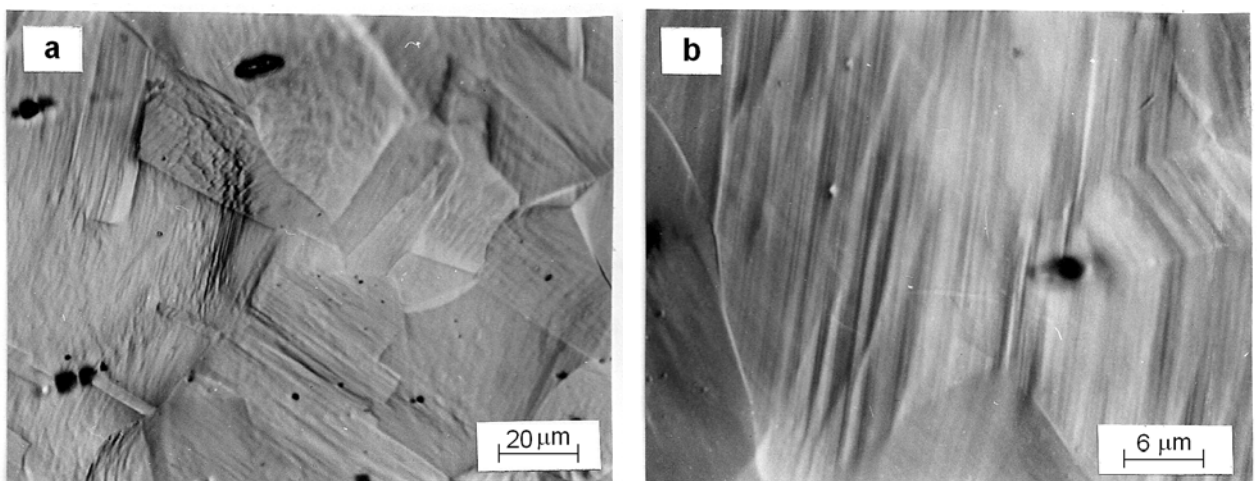
**Figura 2.** Cobre deformado 10% na Barra de Pressão a 77 K.



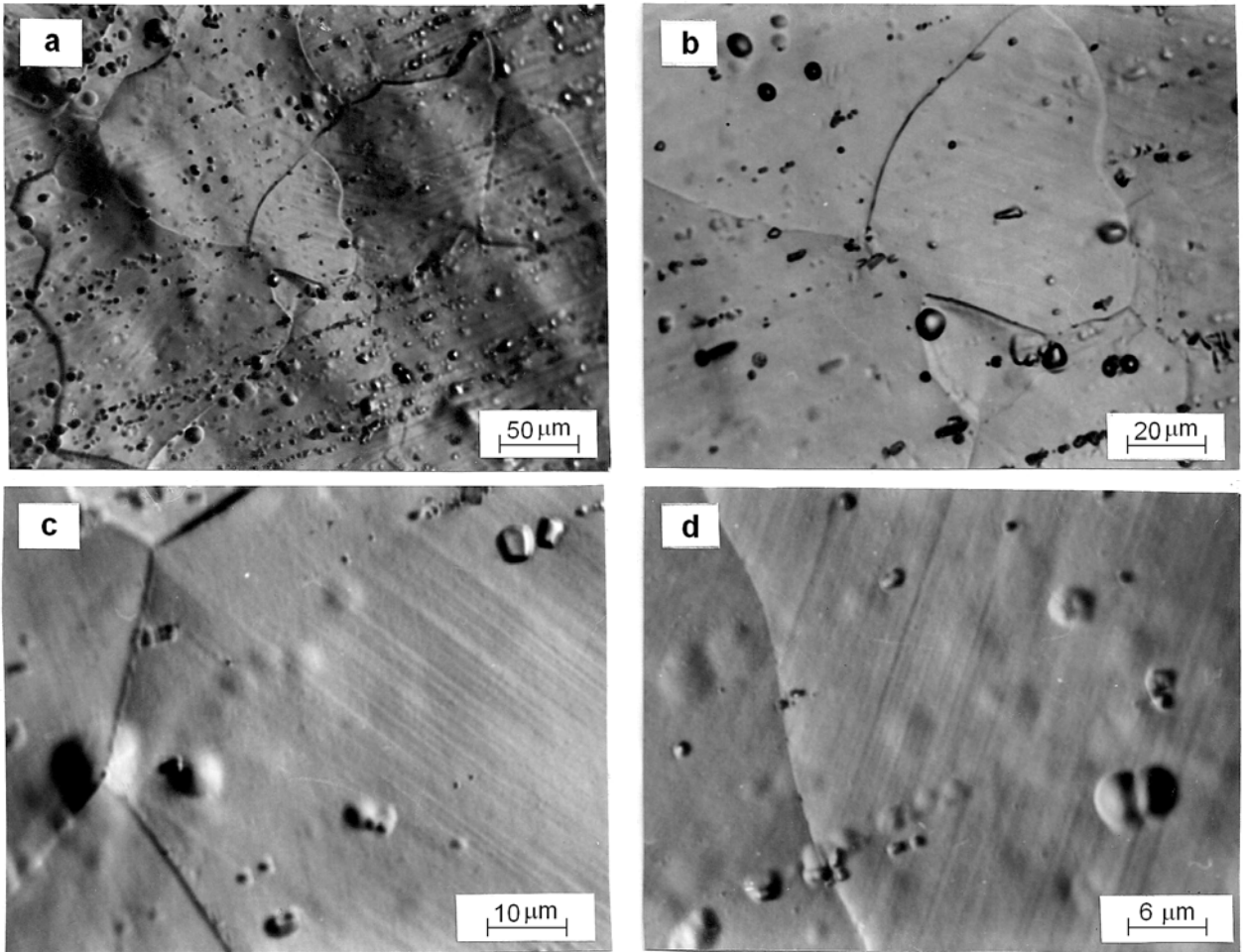
**Figura 3.** Cobre deformado 10% na Barra de Pressão a 300 K.



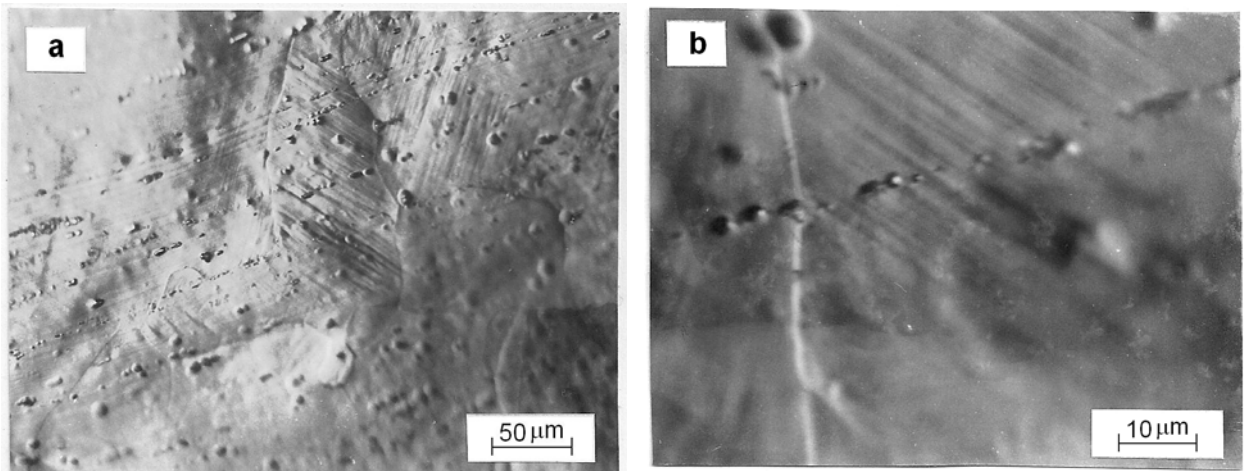
**Figura 4.** Cobre deformado 10% na máquina convencional de ensaio a 300 K.



**Figura 5.** Cobre deformado 10% na Barra de Pressão a 673 K.

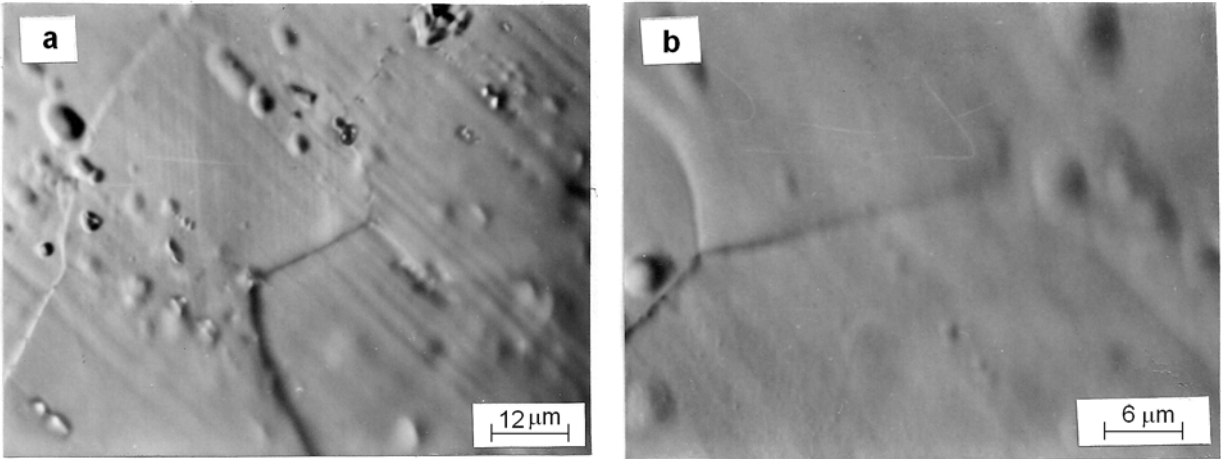


**Figura 6.** Alumínio deformado 10% na Barra de Pressão a 77K.

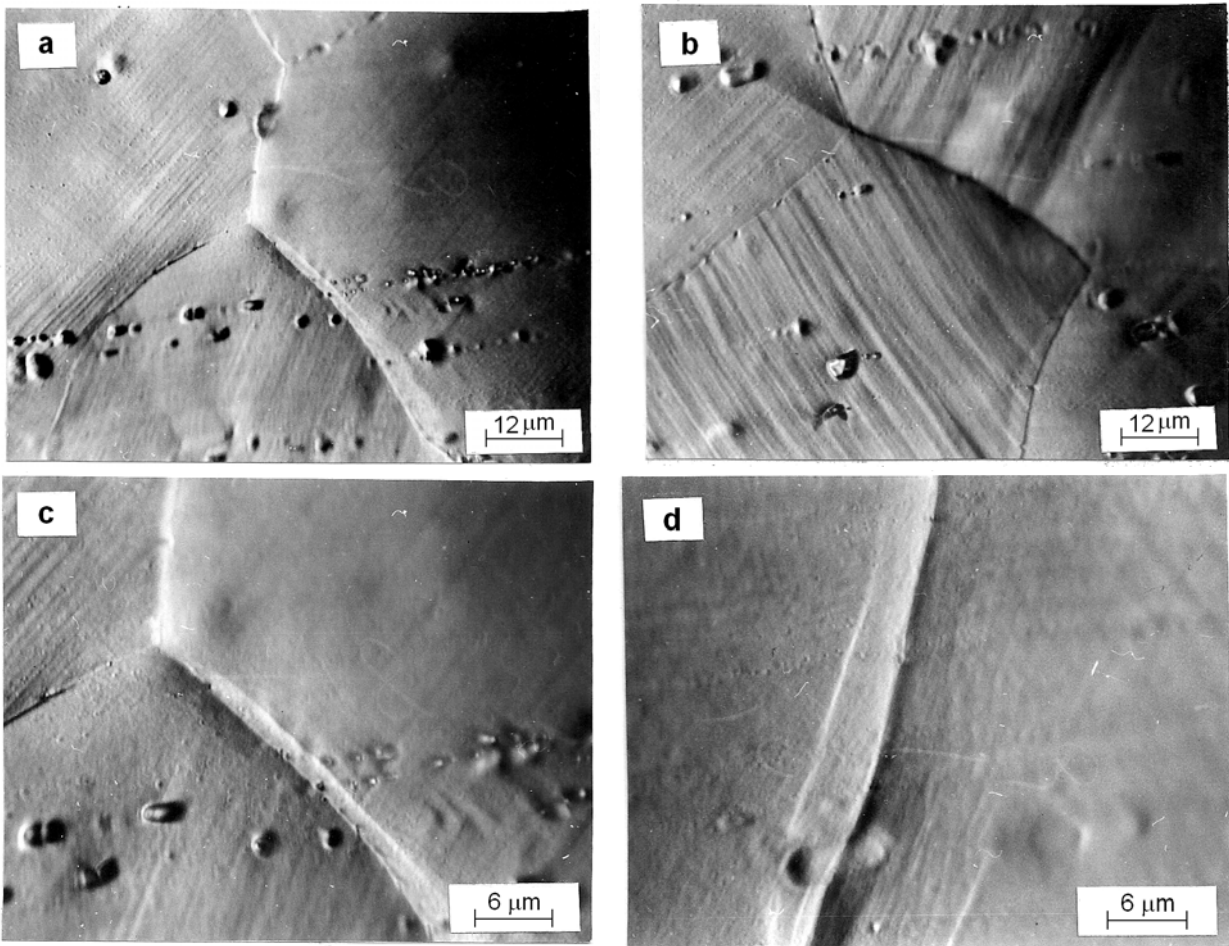


**Figura 7.** Alumínio deformado 10% na Barra de Pressão a 300 K.





**Figura 8.** Alumínio deformado 10% na máquina convencional de ensaio a 300 K.



**Figura 9.** Alumínio deformado 10% na Barra de Pressão a 673 K.

Pelo exposto, supõe-se a presença de maclas mecânicas nas bandas de deformação do tipo A que aparecem no cobre deformado na barra de pressão a 77 K e 300 K. Como o material foi deformado 10%, somente maclas mecânicas não podem ser responsáveis por esta deformação. A deformação máxima que se pode obter em monocristais exclusivamente maclados é da ordem de 8%; por exemplo: no zinco que é de 7,39%.<sup>(7)</sup> A importância da macla mecânica na deformação plástica, além da deformação por ela produzida, são as reorientações cristalográficas resultante da macla, que podem colocar novos sistemas de deslizamento em operação. Portanto, as bandas do tipo A, são em princípio, maclas contendo internamente bandas de deslizamento de discordâncias.

No alumínio deformado na barra de pressão a 77 K e 300 K e na máquina convencional de ensaios a 300 K, os aspectos micrográficos das superfícies são idênticos. Sendo o alumínio um metal CFC com alta energia de falha de empilhamento, não há possibilidade para a ocorrência de maclas mecânicas e as bandas de deformação do tipo B que se observam são bandas de deslizamento de discordâncias.

No cobre deformado a 300 K na máquina convencional de ensaio, as bandas de deslizamento de discordâncias assemelham-se com as do alumínio, são, entretanto mais finas (melhor visibilidade com maior aumento no microscópio). Com a baixa taxa de deformação da máquina convencional de ensaio, a 300 K, supõe-se que a formação de maclas não possa ocorrer (ou estaria no limiar de ocorrência). As bandas de deslizamento mais finas do cobre, comparativamente com as do alumínio, podem ser explicadas em termos da energia da falha de empilhamento. No cobre, a energia da falha de empilhamento é pequena, as discordâncias parciais de Schockley estão afastadas e conseqüentemente as discordâncias terão dificuldades em mudarem do plano de deslizamento em que foram geradas, produzindo na superfície do cristal bandas de deslizamento finas.<sup>(10,11)</sup>

A deformação na barra de pressão a 673 K além de produzir bandas de deformação do tipo B no cobre e no alumínio, neste último, gera também bandas de deformação paralelas aos contornos de grão. As micrografias destes dois materiais deformados a 673 K não podem ser diretamente comparadas, porque esta temperatura corresponde aproximadamente a 70% da temperatura de fusão do alumínio e 50% da temperatura de fusão do cobre (temperatura de fusão em graus Kelvin). No alumínio deformado dinamicamente a 673 K, junto com o mecanismo de movimentação de discordâncias na matriz, presencia-se também um segundo mecanismo de deformação plástica envolvendo o deslocamento (ou escorregamento) entre os grãos. Tem sido mencionado que, com a elevação da temperatura e da taxa de deformação do alumínio, a densidade de discordâncias na matriz diminui, tendendo a um valor constante.<sup>(12)</sup> Este comportamento insinua que a ocorrência de deslocamento entre os grãos limita a movimentação e multiplicação das discordâncias na matriz, significando que os dois mecanismos são competitivos entre si. As micrografias da Figura 9 sugerem que, o deslocamento entre os grãos produz também, na vizinhança dos contornos de grão, deformação plástica por movimentação das discordâncias, formando assim, as bandas de deformação paralelas aos contornos. O mecanismo de deslocamento entre grãos poderia decorrer da sensibilidade para a decoesão dos contornos devido a alta temperatura, associado a uma “pseudo” fragilização em decorrência das ondas de choque atuando sobre os mesmos. Um comportamento que apresenta alguma semelhança com o fenômeno da “queima”, no trabalho a quente dos metais em alta temperatura.<sup>(7)</sup>

## 5 CONCLUSÃO

Após os ensaios, observações metalográficas na superfície dos corpos-de-prova previamente polidos, permitiram discernir duas morfologias distintas para as bandas de deformação no interior dos grãos, uma denominada banda do tipo A, a outra, banda do tipo B.

A morfologia das bandas de deformação correlaciona-se ao mecanismo de deformação plástica decorrente das condições de ensaio e das características estruturais do metal. No cobre, deformado na barra de pressão ( $\dot{\epsilon} = 10^3 s^{-1}$ ) a 77 K e 300 K, a ocorrência de bandas do tipo A está associada a maclagem, em função de sua baixa energia da falha de empilhamento. Quando o cobre é deformado na máquina convencional de ensaios ( $\dot{\epsilon} = 5 \times 10^{-2} s^{-1}$ ) a 300 K, o mecanismo de deformação plástica consiste na movimentação de discordâncias, apresentando bandas do tipo B. A grande energia da falha de empilhamento do alumínio, motivou, sob todas as condições de ensaio, a deformação por movimentação das discordâncias, produzindo bandas do tipo B.

No alumínio deformado na barra de pressão a 673K, além da presença de bandas de deformação no interior dos grãos, ocorre também o deslocamento (ou escorregamento) entre os grãos, motivando a formação de bandas de deformação por movimentação das discordâncias, paralelas e próximas aos contornos de grão.

## REFERÊNCIAS

- 1 BITANS, K., WHITTON, P.W. High strain rate investigations, with particular reference to stress-strain characteristics. *International Metallurgical Reviews*, Review 161, p. 66-78, 1972.
- 2 DAVIES, E.D.H., HUNTER, S.C. The dynamic compression testing of solids by the method of the split Hopkinson pressure bar. *J. Mech. Phys. Solids*, v. 19, p. 155-179, 1963.
- 3 LINDHOLM, U.S. Some experiments with the split Hopkinson pressure bar. *J. Mech. Phys. Solids*, v. 12, p. 317-335, 1964.
- 4 HOLZER, A.J., BROWN, R.H. Mechanical behavior of metals in dynamic compression. *Journal of Engineering Materials and Technology*, v. 101, p. 238-247, 1979.
- 5 LASSILA, D.H., SHEN, T., CAO, B.Y., MEYERS, M.A. Effect of low temperature shock compression on the microstructure and strength of copper. *Metallurgical and Materials Transactions A*, v. 35A, p. 2729-2739, 2004.
- 6 STEVENSON, M.E., JONES, S.E., BRADT, R.C. The high strain rate dynamic stress-strain curve for OFHC copper. *Materials Science Research International*, v.9, n. 3, p. 187-195, 2003.
- 7 DIETER, G.E. *Mechanical Metallurgy*. McGraw-Hill, 1976.
- 8 MEYERS, A.M., VOHRINGER, O., CHEN, Y.J. A constitutive description of the slip-twinning transition in metals. *Advances in Twinning*, Edited by Anken and C.S. Pande, The Minerals, Metals & Materials Society, 1999.
- 9 GOREKIK, S.S. *Recrystallization in Metals and Alloys*. MIR Publishers, Moscow, 1981.
- 10 BARRETT, C., MASSALSKI, T.B. *Structure of Metals*. Pergamon Press, 1980.
- 11 GILMAN, J.J. *Micromechanics of Flow in Solids*. McGraw-Hill, 1969.
- 12 SAMANTA, S.K. Dynamic deformation of aluminum and copper at elevated temperatures. *J. Mech. Phys. Solids*, v. 19, p. 117-135, 1971.