



## **ESTUDO DA CINÉTICA DE CRESCIMENTO DE GRÃO EM METAL**

**Lucas N. TAVARES (1); Rhary G. V. de OLIVEIRA (2); J. L. L. GAMA (3)**

(1) CEFET-AL, Rua Barão de Atalaia, s/n, Centro-Maceió-AL CEP 57.020-510,  
Coord. Mecânica, Tel.: 82-2126-7082, e-mail: luk\_tav@hotmail.com;

(2) CEFET-AL, e-mail: rhary\_oliveira@hotmail.com;

(3) CEFET-AL, e-mail: jorgelauriano@gmail.com.

### **RESUMO**

O tamanho de grão, por interferir na capacidade de deformação plástica dos materiais metálicos, constitui-se como um importante elemento de controle das propriedades mecânicas. Neste trabalho, busca-se, a partir de conhecidas relações matemáticas, traçar a curva evolutiva do crescimento de grão, assim como obter parâmetros que favoreçam a tomada de decisão na conformação mecânica do cobre comercial e suas ligas. Empregou-se tratamento térmico de recozimento em diversas temperaturas durante duas horas. Os grãos foram medidos em um microscópio ótico. Considerando os resultados obtidos, foram informados parâmetros empíricos para a conformação mecânica. Espera-se com este trabalho iniciar uma cultura de pesquisa junto ao corpo discente do ensino técnico do CEFET-AL, no âmbito do curso de mecânica, ao mesmo tempo em que busca subsidiar pesquisa de simulação computacional do crescimento de grão no departamento de física da instituição.

**Palavras-chave:** crescimento de grão; metais; cinética empírica.

## INTRODUÇÃO

Materiais metálicos têm como parâmetros avaliativos de suas propriedades mecânicas a composição química, a microestrutura e o histórico termo-mecânico. Mantendo-se a composição química e o histórico termo-mecânico, observa-se, em temperatura ambiente, que à medida que se diminui o tamanho de grão, aumenta-se a resistência mecânica, a tração e a dureza. Este fato é justificado pela atuação dos contornos de grão como barreiras naturais à propagação de descontinuidades e à deformação plástica; desta forma o tamanho de grão, por interferir na capacidade de deformação plástica dos materiais metálicos, constitui-se como um importante elemento de controle das propriedades mecânicas.

Neste trabalho, busca-se, a partir de conhecidas relações matemáticas traçar a curva evolutiva do crescimento de grão em função da temperatura, assim como obter parâmetros que favoreçam a tomada de decisão na conformação mecânica do cobre comercial e suas ligas.

## METODOLOGIA

Amostras de cobre comercial, com 99,98% de pureza, foram seccionadas em serra alternativa em dimensões reduzidas a barras. Dessas barras, amostras menores foram serradas manualmente com refrigeração forçada tomando-se cuidado para não haver superaquecimento. Amostras nas dimensões médias de 30 x 15 x 5 mm foram submetidas a tratamentos isotérmicos em forno de mufla nas temperaturas de 573, 673, 773, 873 e 973<sup>o</sup>K, com precisão de leitura de  $\pm 5^{\circ}\text{K}$  durante duas horas. Após este tempo de exposição, as amostras foram resfriadas em água.

A preparação metalográfica seguiu o procedimento convencional, que consistiu em embutimento a quente; lixamento nas lixas 120, 240, 320, 400 e 600 e polimento em pasta de diamante nas granulometrias de 15, 6 e 3  $\mu\text{m}$ . Empregou-se microscopia ótica pelo emprego de um microscópio ótico Olympus modelo PME. A medição dos tamanhos de grão seguiu o procedimento previsto na norma ASTM E-112 (2004), baseado na interseção de contornos de grão com uma linha reta de dimensão conhecida. Empregou-se a relação  $TG = \ell/nX$ , onde  $\ell$  é o tamanho da linha conhecido,  $n$  é o número de interseções observadas e  $X$ , o aumento empregado no microscópio. Mediu-se o tamanho de grão em amostra sem tratamento térmico, assim como nas amostras submetidas aos tratamentos térmicos. Foram realizadas sete medições em cada amostra. Os valores extremos foram desprezados, tendo sido considerado como valor final a média aritmética entre as outras cinco leituras.

O tratamento dos dados baseou-se no emprego da equação da cinética de crescimento de grão [1] e na equação de Arrhenius para processos termicamente ativados [2].

$$D = D_0 + Kt^n \quad [1]$$

$$K = K_0 \exp[-E_A/RT] \quad [2]$$

Com essas equações, substituindo-se [2] em [1], e aplicando-se o logaritmo natural, conclui-se que:

$$\ln(D - D_0) = \ln k_0 + n \ln t - E_A/RT \quad [3]$$

Com os dados obtidos na equação [3] e traçando-se a curva  $\ln(D - D_0)$  contra o inverso da temperatura ( $1/T$ ), obtém-se uma equação do tipo  $Y = A + BX$ . Nesta equação “A” representa a interseção da reta com o eixo dos Y e nos fornece o valor de  $\ln(K_0 t^n)$ , enquanto a inclinação da reta nos fornece o valor de “B”, sendo  $B = -E_A/R$ . O valor da energia de ativação empírica do processo de crescimento de grão foi obtido através do valor de “B”. Nesta equação,  $R$  é a constante dos gases e vale 8,31 Joules / mol <sup>o</sup>K.  $K_0$  depende da temperatura e seu valor é 1 para processos isotérmicos, uma vez que não se tem mudança na temperatura. Os valores de “K” e “n” são obtidos empiricamente e dependem do material e da temperatura. Segundo Reed-Hill (1983) e como pode ser verificado por Gama (2003), o significado prático de “K” e “n” está associado à rapidez com a qual a reação é realizada.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O tamanho de grão inicial medido foi de 0,011 mm. A curva  $\ln(D - D_0)$  em função do inverso da temperatura está mostrada na figura 1. Nela podemos distinguir distintamente duas inclinações. O trecho A, entre as temperaturas 773 e 973 °K, está mostrado em detalhe na figura 2(A), e o trecho B, entre as temperaturas 573 e 773 °K, indicado na figura 2(B). Analisando a curva da figura 1, observamos, como indica a tabela 1, um fator de correlação de 0,956, enquanto nas curvas das figuras 2(A) e 2(B) os valores dos fatores de correlação foram de 0,969 para o trecho A e 0,995 para o trecho B, indicando, de fato, o melhor ajuste dos dados para a consideração de distintas inclinações da curva. Isso sugere a existência de dupla cinética no processo de crescimento de grão do cobre comercial. No primeiro estágio da curva, trecho A na figura 2(A), o valor de energia envolvida no processo foi de 13,5 KJ/mol °K, enquanto o valor da energia no trecho B, figura 2(B), foi de 140,0 KJ/mol °K, o que implicou numa queda de 90,4% no valor da energia com o aumento da temperatura, indicando aumento na velocidade de crescimento de grão com a temperatura. A energia necessária para que o grão continuasse a crescer cai e a velocidade de crescimento aumenta, tal como no processo de recristalização secundária em metais inicialmente deformados plasticamente.

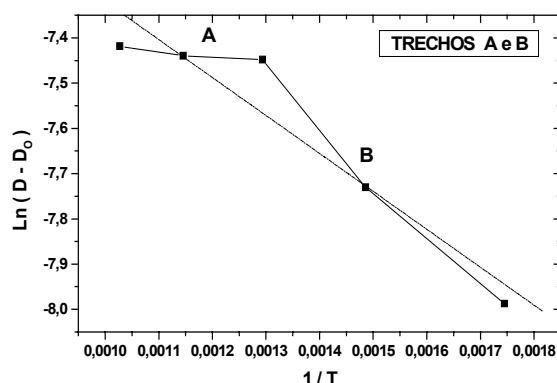


Figura 1 – Curvas  $\ln(D - D_0)$  em função de  $1/T$  considerando única cinética.

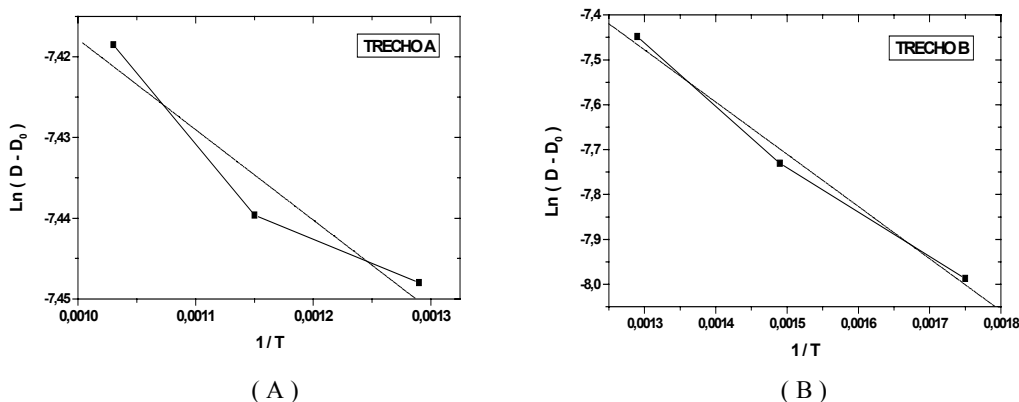


Figura 2 - Curvas  $\ln(D - D_0)$  em função de  $1/T$  em dupla cinética. (A) Primeiro estágio. (B) Segundo estágio.

Os valores de “n” entre o trecho B e o trecho A, como mostra a tabela 1, apresentaram uma menor variação, com um aumento de 10,8% com o aumento da temperatura, porém com um grande significado físico, sugerindo grande mudança no mecanismo de crescimento de grão. Nesta etapa do crescimento, os grãos avançam, crescendo numa velocidade mais acentuada.

Reed-Hill (1983) relata em seus estudos que, para metais deformados plasticamente, a energia de ativação para o processo de recristalização e crescimento de grão é definida em função do histórico térmico, da deformação plástica inicial, da taxa de aquecimento, de impurezas presentes e do tamanho de grão inicial,

sendo muito mais complexo e ocorrendo numa velocidade maior. Espera-se, assim, que para metais não deformados plasticamente, o valor da energia para o processo de crescimento de grão seja menor.

**Tabela 1 – Valores dos parâmetros obtidos dos gráficos  $\ln(D - D_0)$  em função de  $1/T$ .**

Trecho	Fator correlação	n	Energia (KJ/mol $^0K$ )
A + B	0,956	0,210	100,9
A	0,969	0,223	13,5
B	0,995	0,201	140,0

Em estudos sobre o processo de recristalização no cobre eletrolítico realizado por Hernaez et al. (1966) e Decker e Harker (1950), revelaram que quanto menor o grau de deformação à tração maior a energia necessária para que o crescimento de grão ocorra. Para o cobre comercial, foi verificado que este valor oscila entre 43,4 KJ/mol  $^0K$  para grau de deformação de 10% e 26,4 KJ/mol  $^0K$  para grau de deformação de 30%. Num outro estudo realizado por Volta (1972), para o cobre comercial com 99,95% de pureza e 85% de deformação por laminação verificou-se que durante a recristalização o processo consome uma energia em torno de 229,7 KJ/mol  $^0K$ , enquanto que em estudos de Decker e Harker (1950), para o cobre com 95% de deformação, a energia requerida encontra-se em torno de 92 KJ / mol  $^0K$ . A deformação atua como uma força motriz, favorecendo o crescimento de grão. Considerando o nosso estudo, material não deformado e o maior grau de impureza associado ao cobre comercial, e não considerando as outras variáveis que também poderiam interferir em menor grau, como relatado por Reed-Hill (1983), obtivemos valor de energia maiores para o crescimento de grão, estando assim coerente com as constatações realizadas por Volta (1972), Hernaez et al. (1966) e Decker e Harker (1950).

No presente trabalho, nos dois estágios, os valores de “n” situaram-se em torno de 0,2. Padilha (1996) cita que este valor estaria entre 0,2 e 0,5 para o estudo de recristalização em materiais previamente deformados esse valor estaria em torno de 0,3 para a maioria dos metais. Para Reed-Hill (1983), o valor de “n” previsto pela equação de crescimento de grão [1] é muitas vezes menor do que o valor teórico bastante usual de 0,5 e diminui com o aumento do átomo de soluto presente. Em geral não é um valor constante para um dado metal ou liga metálica, variando com a temperatura da reação isotérmica. Em um estudo seu, em uma liga de alumínio-1,1% manganês, foi avaliado que este valor variou de 0,02, para um crescimento quase inexistente na temperatura de 898 $^0K$  para 0,42 para a temperatura de 923 $^0K$ . Observou-se, assim, uma grande variação no valor de “n” para uma variação de apenas 25 $^0K$  na temperatura.

A mudança no declive da curva, como mostra a figura 1 e figuras 2(A) e 2(B), indica uma melhor facilidade de deformação plástica no cobre, a partir de 770 $^0K$  ( $1/T = 0,0013 \text{ } ^0K^{-1}$ ), indicando ser esta a temperatura referência acima da qual a trabalhabilidade, ou a facilidade com que o metal poderia ser conformado por deformação plástica, é favorecida. Estes parâmetros levantados na presente pesquisa tornam-se extensivos a todas as ligas metálicas que apresentam o cobre como matriz.

## CONCLUSÃO

- A cinética de crescimento de grãos para o cobre comercial não deformado apresenta dupla cinética. No estágio inicial, temperaturas mais baixas, a energia dissipada para que o processo ocorresse foi de 140,0 KJ/mol $^0K$ , enquanto em estágio posterior, em temperaturas maiores, a energia foi de 13,5 KJ/mol  $^0K$ ;
- O valor do coeficiente angular “n” situou-se em torno de 0,2, valor este compatível com observação relatadas na literatura para a maioria dos metais para o crescimento de grão na faixa de temperatura estudada.
- A temperatura que marca a transição de primeiro para o segundo estágio situou-se em torno de 770 $^0K$  ( $\approx 500 \text{ } ^0C$ ). Deste ponto de transição para temperaturas maiores, o cobre comercial e suas ligas

tornam-se mais facilmente trabalháveis, sendo temperaturas acima desta em que deve ser realizada conformação mecânica.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING IN MATERIALS-ASTM E112-96(2004)e2 **Standard Test Methods for Determining Average Grain Size.**

DECKER, B. F.; HARKER, D. **Recrystallization in rolled copper.** Transactions AIME, V.188, p.887, 1950.

FERREIRA, R. A. S. **Transformação de fase – aspectos cinéticos e morfológicos.** Editora universitária. Recife-PE, UFPE. 2002.

GAMA, J. L. L. **Transformação de fase em ligas de cobre com memória de forma. Tese (doutorado em engenharia),** DEN-UFPE, 2003.

HERNAEZ, J.; REGIDOR, J. e TORRALBA, M. **Estúdio de la recrystalización de um cobre de alta pureza a partir da curva tension-deformación.** Rev. Met., Cenin, v.2, n.1, 1966, pp-5-14.

PADILHA, Ângelo Fernando; Siciliano Jr, Fúlvio. **Encruamento, recrystalização, crescimento de grão e textura.** Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2ª. edição. São Paulo, 1996.

REED-HILL, Robert E.. **Princípios de metalurgia física.** Guanabara dois, 2ª. edição., Rio de Janeiro, 1983.

VOLTA, Roberto Ângelo; Chojnowski, Edmundo A. **Recrystalização do cobre com 99,95% de pureza laminado a frio e fatores que influenciam na energia de ativação do processo.** XXVII Congresso anual da ABM, São Paulo, SP. Julho, 1972.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao CEFET-AL pelo incentivo e a aluna Lorraine Evilin Tavares pela colaboração nos momentos iniciais dos experimentos.