

Fluência do Alumínio de Alta Pureza. Efeitos da Mudança na Tensão Durante o Ensaio

IRIS FERREIRA⁽¹⁾
ROBERT G. STANG⁽²⁾

O efeito de redução na tensão aplicada na taxa de fluência e tamanho de subgrão foi estudado para o alumínio de alta pureza deformado a 573°K. Os resultados obtidos mostram que a taxa de fluência após a redução de tensão decresce, inicialmente durante um certo intervalo de tempo, após o qual cresce tendendo ao seu valor estacionário. O aumento na taxa de fluência é acompanhado por correspondente aumento no tamanho médio de subgrão. Uma relação bem definida entre o tamanho de subgrão e a taxa de fluência é obtida após as reduções de tensão. Foi obtida uma equação fenomenológica descrevendo a taxa de fluência em termos de tensão aplicada e do tamanho médio de subgrão.

1. INTRODUÇÃO

Os metais puros e ligas de classe II, quando deformados em fluência a alta temperatura, apresentam uma microestrutura caracterizada principalmente pela presença de subgrãos⁽¹⁾. Entretanto, a grande maioria das teorias propostas para descrever o processo de fluência estacionária não considera o tamanho de subgrão como variável importante, nem inclui a presença dos subcontornos de grão na formulação da equação de fluência.

As razões para se relegar os subgrãos a um papel secundário no processo de fluência se basearam em evidências experimentais obtidas nos anos 50, as quais indicavam que um estado estacionário de fluência, no qual a densidade de discordâncias, tamanho de subgrão e misorientação^(*) através de subcontornos se mantivessem constantes, não existiam⁽²⁻⁵⁾.

Num trabalho recente em que o alumínio foi extrudado a quente, mostrou-se que o tamanho médio de subgrão, assim como a misorientação e forma, permanecem essencialmente constantes até deformações da ordem de 3,7⁽⁶⁾. Essa constância do tamanho de subgrãos e misorientação, durante o estágio estacionário de fluência, tem sido reconfirmada numa série de casos^(7,8), usando microscopia eletrônica de transmissão.

Uma tentativa para se incorporar o tamanho de subgrão na formulação do processo de fluência foi feita por Robinson e Sherby⁽⁹⁾. Analisando os dados de fluência existentes na literatura para o tungstênio, esses autores propuseram uma equação para descrever a taxa de fluência no estado estacionário, na qual o tamanho de subgrãos aparece explicitamente. Mais tarde, Young e outros⁽¹⁰⁾, usando procedimento diferente, obtiveram resultados semelhantes para o alumínio.

Recentemente, Sherby e outros⁽¹¹⁾ reanalisaram os dados disponíveis na literatura para vários materiais e propuseram uma equação da forma:

$$\dot{\epsilon}_i = S \frac{D}{b^2} \left(\frac{\lambda}{b}\right)^p \left(\frac{\sigma}{E}\right)^N \quad (1)$$

onde:

$\dot{\epsilon}_i$ = taxa de fluência instantânea;

(*) Diferença de orientação entre dois subgrãos.

Contribuição Técnica nº 1592. Apresentada ao XXXV Congresso Anual da ABM; julho de 1980; São Paulo SP.

(1) Membro da ABM. Doutor em Engenharia Metalúrgica; Gerente da Área de Combustíveis Especiais do Centro de Metalurgia Nuclear; Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares; São Paulo SP.

(2) Professor Associado do Departamento de Engenharia Metalúrgica; University of Washington; Seattle; EE.UU.

D = coeficiente de difusão;
b = módulo do vetor de Burgers;
 λ = tamanho médio de subgrão;
 σ = tensão aplicada;
E = módulo de elasticidade;
S, N e p = constantes.

Na equação (1) p = 3 e N = 8, para o alumínio.

Na formulação dessa expressão os autores assumem implicitamente que o comportamento transiente, após redução na tensão aplicada, durante o estágio estacionário, deve ser acompanhado de aumento do subgrão. Essa idéia foi criticada por Parker e Wilshire⁽¹²⁾, cujas experiências não evidenciaram nenhum aumento de tamanho de subgrão após mudança na tensão aplicada. Resultados semelhantes foram publicados por Mitra e McLean⁽¹³⁾ e Pontikis e Poirier⁽¹⁴⁾. Dados mais recentes obtidos pelos presentes autores⁽¹⁵⁾ demonstraram que o crescimento de subgrão ocorre em alumínio de alta pureza após reduções na tensão aplicada.

O objetivo do presente trabalho é verificar experimentalmente a dependência da taxa de fluência com a tensão e tamanho de subgrão, como expressa na equação (1). Para tanto, foram realizados ensaios em que a tensão aplicada é reduzida durante o estágio estacionário de fluência, sendo acompanhada a evolução da microestrutura.

2. MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Foi utilizado alumínio de alta pureza (99,999%), adquirido na forma de barras com 1 cm de espessura. Cada lingote foi submetido a laminação a frio por passes, seguida de tratamentos térmicos intermediários a 753 K ao ar, por 1 h, até a espessura final de 1,3 mm. Corpos-de-prova planos com comprimento útil de 3,81 cm e seção de 1,3 mm X 9,5 mm foram em seguida usinados a partir da chapa obtida. Em seguida foram tratados a 753 K, por 1 h, resultando num grão final de tamanho médio de 0,5 μ m.

Os ensaios de fluência descritos nesse trabalho foram conduzidos ao ar a 573 K sob tensão constante, usando-se equipamento especialmente desenhado para esse estudo. A aparelhagem foi construída de forma a permitir o movimento do forno e arrefecimento rápido do corpo-de-prova sob tensão, sempre que necessário. Os gradientes de temperatura ao longo do comprimento útil do corpo-de-prova foram inferiores a $\pm 0,5$ K e a variação de temperatura durante os ensaios, inferior a ± 1 K. A medida de deformação foi feita utilizando-se transdutor que permitisse leituras de até 5×10^{-4} .

Nos ensaios em que se reduziu a tensão aplicada, a carga a ser aplicada ao corpo-de-prova foi dividida em dois recipientes conectados por um fio. A redução de tensão era

obtida através do corte, por maçarico, do fio de conexão dos recipientes técnica essa que permite uma taxa de descarregamento bastante elevada.

Ensaio de redução de tensão foram conduzidos a 573 K para amostras submetidas a tensões iniciais de 15; 8,35 e 6,23 MPa; as reduções foram feitas uma vez atingida a deformação total de 16%, escolhida por corresponder ao estado estacionário de fluência para todas as tensões iniciais consideradas. Registrou-se a deformação em função do tempo, antes e após a redução de tensão.

A microestrutura das amostras deformadas foi analisada usando microscopia ótica. Os métodos empregados na preparação das amostras são descritos na bibliografia⁽¹⁵⁾. O diâmetro médio de subgrão foi determinado usando a especificação da ASTM⁽¹⁶⁾.

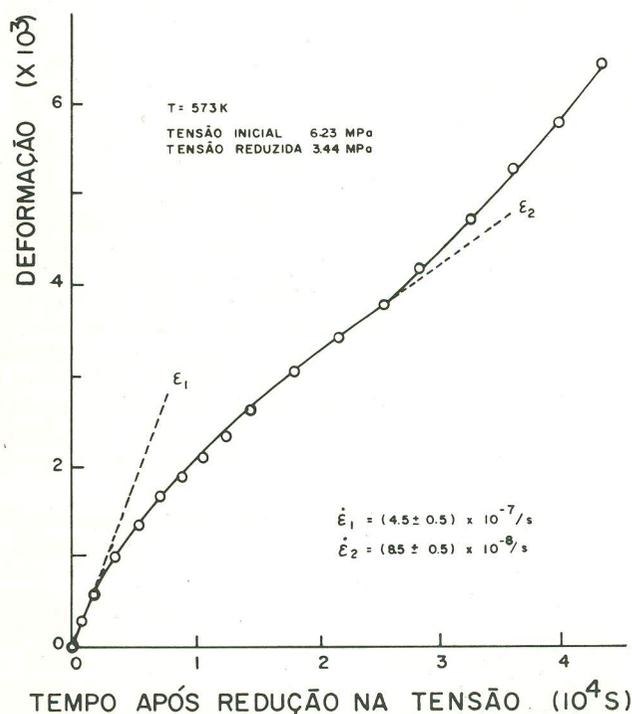


Fig. 1 - Comportamento típico de fluência obtido a 573 K, após redução de 6,23 a 3,44 MPa na tensão, durante o estágio estacionário.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 1 mostra o comportamento típico da deformação em função do tempo, a 573 K, após mudança de tensão para o caso em que a tensão é reduzida de 6,23 para 3,44 MPa. Observa-se que a taxa de deformação, determinada a partir da derivada da curva deformação-tempo, decresce de um valor inicial ϵ_1 para um valor mínimo ϵ_2 , durante um intervalo de tempo finito. Em seguida, a taxa de deformação cresce aproximando-se de seu valor estacionário correspondente à tensão reduzida. Comportamento semelhante ao observado no presente trabalho foi também obtido por Raymond e outros⁽¹⁷⁾.

A figura 2 mostra as curvas obtidas a 573 K após reduções da tensão de um valor inicial de 15 MPa para valores de 8,35; 6,23 e 3,44 MPa. Na figura 3 são mostradas as curvas para a taxa de fluência em função do tempo, determinadas através da derivada das curvas da figura 2. A figura 4 mostra o comportamento do tamanho médio de subgrão

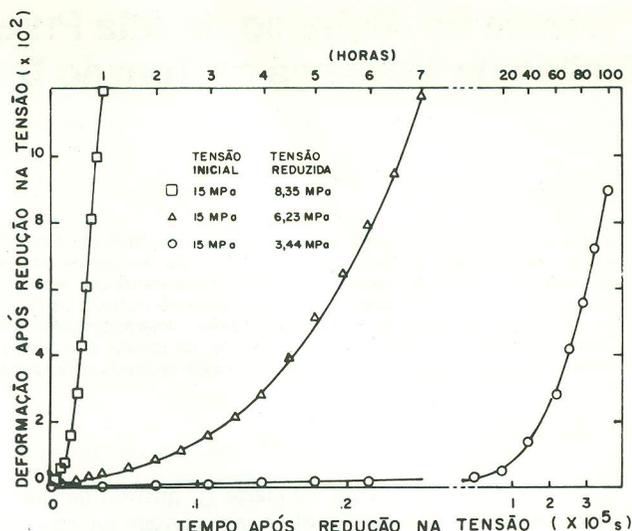


Fig. 2 - Curvas de formação em função do tempo, ilustrando o comportamento da formação a 573 K, após reduções na tensão de um valor inicial de 15 MPa para 8,35, 6,23 e 3,44.

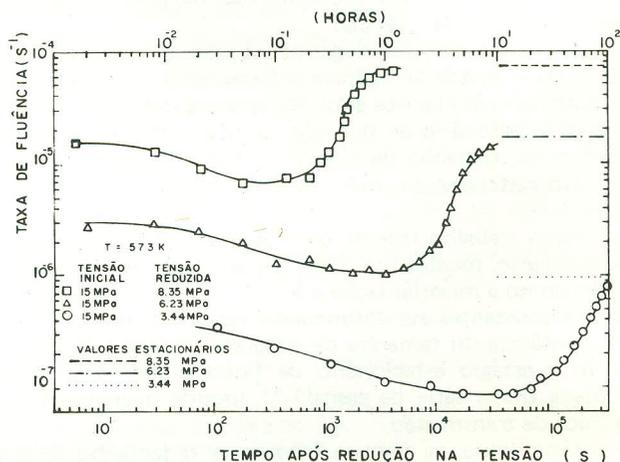


Fig. 3 - Variação da taxa de fluência em função do tempo, a 573 K, após reduções na tensão de 15 MPa para 8,35, 6,23 e 3,44. Estão incluídas as taxas de fluência estacionárias, de amostras não submetidas a redução de tensão, para comparações.

após a redução na tensão. Cada ponto na figura 4 representa um ensaio de fluência interrompido num determinado instante de tempo, após a mudança na tensão, para a medida do tamanho de subgrão.

A comparação das curvas da taxa de fluência versus tempo (Fig. 3) e tamanho médio de subgrão versus tempo (Fig. 4) mostra claramente que:

- Durante o período inicial após a redução de tensão, em que a taxa de fluência decresce, não ocorre nenhuma mudança no tamanho de subgrão.
- Durante o período em que a taxa de fluência aumenta, o tamanho médio de subgrão também aumenta.
- À medida em que a taxa de fluência aumenta, tendendo ao seu valor de equilíbrio à tensão reduzida, o tamanho médio de subgrão também aumenta, aproximando-se do seu valor de equilíbrio à tensão reduzida.

Os dados correspondentes ao estágio estacionário de fluência são obtidos da bibliografia⁽¹⁸⁾. Os ensaios de fluência foram interrompidos a deformações totais da or-

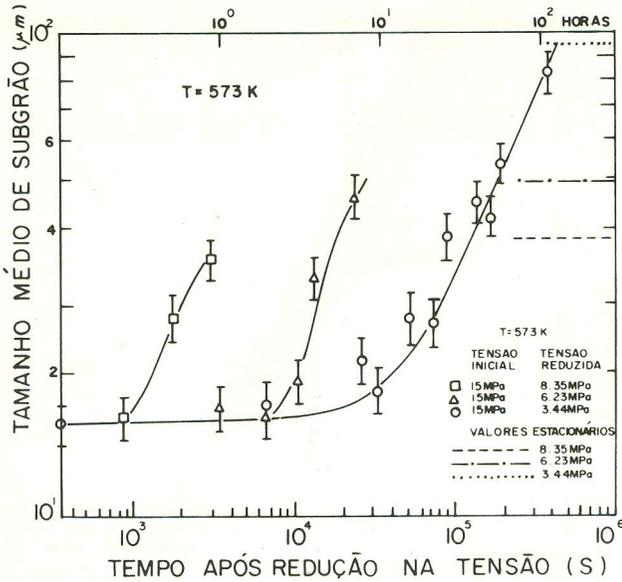


Fig. 4 - Tamanho médio de subgrão em função do tempo após a redução de tensão, para amostras submetidas a reduções na tensão de 15 MPa para 8,35, 6,23 e 3,44, a 573 K. Estão incluídos os valores obtidos no estágio estacionário, para comparações.

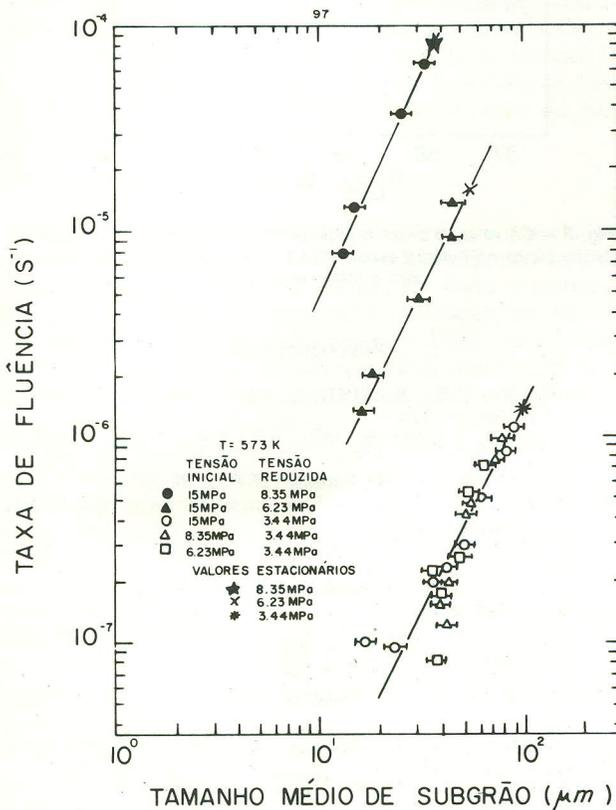


Fig. 5 - Taxa de fluência versus tamanho de subgrão para amostras submetidas a reduções de tensão de 15 MPa para 8,35, 6,23 e 3,44; de 8,35 MPa para 3,44; de 6,23 MPa para 3,44. Todas as reduções de tensão foram feitas a 573 K, na formação real de 16%.

dem de 28% porque a redução de seção do corpo-de-prova se iniciava, em alguns casos, próximo de 30% de deformação.

A figura 5 mostra os valores da taxa de fluência obtida no instante em que o ensaio foi interrompido em função do

tamanho médio de subgrão medido em cada amostra. Nessa figura estão incluídos os resultados de reduções na tensão de 15 MPa para 8,35; 6,23 e 3,44 MPa; de 8,35 para 3,44 MPa e de 6,23 para 3,44 MPa. Os valores do tamanho médio de subgrão no estágio estacionário são mostrados para comparação. Essa figura mostra claramente que durante o intervalo de tempo no qual a taxa de fluência cresce, após a mudança de tensão, a correlação entre a taxa de fluência e o tamanho médio do subgrão, para todos os níveis de tensão reduzida, pode ser expressa por:

$$\dot{\epsilon}|_{\sigma} = A \lambda^2 \tag{2}$$

A constante A depende da tensão reduzida.

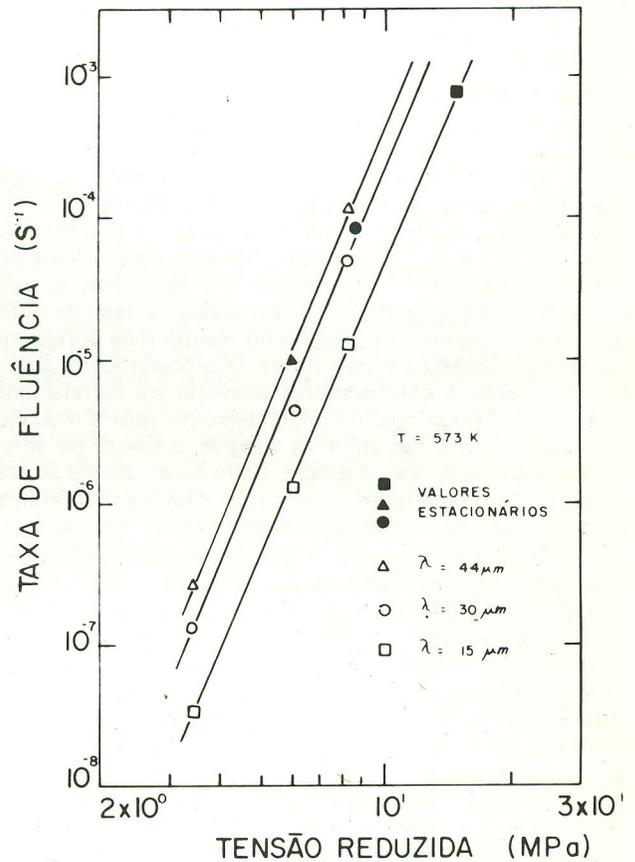


Fig. 6 - Taxa de fluência versus tensão reduzida, para tamanho médio de subgrão constante ($\lambda = 44, 30$ e $15 \mu m$).

Os dados apresentados na figura 5 podem ser utilizados para construir o gráfico da taxa de fluência em função da tensão reduzida para tamanho médio de subgrão constante. O resultado desse procedimento é mostrado na figura 6 para os valores $\lambda = 44, 30$ e $15 \mu m$. Observa-se que, para λ constante, a taxa de fluência pode ser expressa por:

$$\dot{\epsilon}|_{\sigma} = A' \sigma^{6,8 \pm 0,2} \tag{3}$$

onde A' é uma constante.

Os resultados expressos pelas equações (2) e (3) indicam que uma expressão de forma:

$$\dot{\epsilon} = B \lambda^2 \sigma^7 \tag{4}$$

onde B é uma constante, descreve os resultados experimentais. Isto é verificado na figura 7, da qual se pode determinar $B = 2,1 \times 10^{-44} \text{ (s}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ Pa}^{-7})$.

Usando, agora, os seguintes valores:

$$D (573\text{K}) = 8,82 \times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{s}^{(19)};$$

$$E (573\text{K}) = 5,698 \times 10^{10} \text{ N/m}^2 \text{ (20)};$$

$$b = 2,86 \times 10^{-10} \text{ m};$$

a equação (4) pode ser expressa numa forma semelhante à da equação (1), resultando:

$$\dot{\epsilon} = 3 \times 10^4 \frac{D}{b^2} \left(\frac{\lambda}{b}\right)^2 \left(\frac{\sigma}{E}\right)^7 \quad (5)$$

É interessante notar que a equação (5) se reduz à forma mais familiar:

$$\dot{\epsilon} \propto \sigma^5 \quad (6)$$

quando a dependência do tamanho médio de subgrão com respeito à tensão, no estado estacionário $\lambda_s \propto \sigma^{-1}$ — obtida em trabalho anterior⁽¹⁵⁾ — é substituída na equação (5).

A equação (5) tem o mesmo caráter geral da equação (1), proposta por Sherby e colaboradores⁽⁹⁻¹¹⁾. Os valores determinados experimentalmente no presente trabalho, $N = 7$ e $p = 2$, diferem daqueles encontrados por Sherby e outros⁽¹¹⁾ — $N = 8$ e $p = 2$. Para obter os valores de N e p esses autores utilizam dados de taxa de fluência e tamanho médio de subgrão no alumínio de pureza média, publicados por vários autores. O procedimento utilizado por Sherby e colaboradores consistiu em correlacionar a taxa de fluência medida imediatamente após a mudança de tensão, com o tamanho de subgrão presente na amostra antes da mudança de tensão. Além disso, devido ao fato de os dados compilados terem sido obtidos a diferentes temperaturas, foi necessária normalização dos mesmos.

No presente estudo um procedimento diferente é adotado, qual seja o de correlacionar a taxa de fluência instantânea, durante o transiente de fluência que segue a uma redução de tensão, com o tamanho médio de subgrão presente, naquele instante, na amostra. Além disso, todos os valores de tamanho médio de subgrão e taxa de fluência são obtidos utilizando o mesmo material (99,999% Al), sob idênticas condições experimentais. Nos trabalhos de Sherby e colaboradores⁽⁹⁻¹¹⁾ os resultados finais podem ter sido influenciados por outras variáveis, como tamanho médio de grão das amostras, deformação na qual a tensão foi reduzida, sensibilidade do equipamento e diferentes procedências das amostras.

4. CONCLUSÕES

No presente trabalho foram apresentados dados mostrando que, em oposição ao que admite a maioria das teorias de fluência, o tamanho de subgrão pode ser uma variável importante nos mecanismos que controlam o processo de fluência.

Quando o material é deformado em fluência até o estado estacionário e em seguida submetido à redução na tensão aplicada, observa-se que o aumento da taxa de fluência é acompanhado de aumento do tamanho médio de subgrão (Fig. 7). Usando uma técnica experimental na qual a taxa de fluência e o tamanho de subgrão podem ser medidos em qualquer instante após a redução de tensão, foi desenvolvida uma equação fenomenológica para a taxa instantânea de fluência que inclui explicitamente a tensão e tamanho médio do subgrão.

Este trabalho comprova as idéias de Sherby e colaboradores⁽⁹⁻¹¹⁾ e está em desacordo com as observações de Pontikis e Poirier⁽¹⁴⁾.

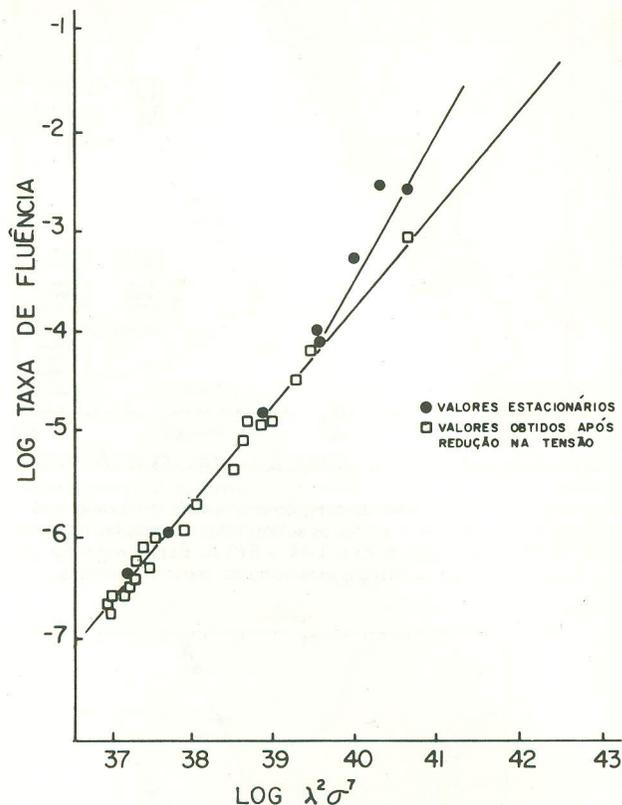


Fig. 7 — Correlação entre o logaritmo da taxa de fluência a 573 K, obtida tanto no estágio estacionário como após reduções de tensão, com o logaritmo de $\lambda^2 \sigma^7$.

BIBLIOGRAFIA

1. SHERBY, O.D.; & BIRKBE, P.M. — Progress in Mat. Sci.; v. 13; 1968; p. 325.
2. JENKINS, C.H.M.; & MELLOR, G.A. — JISI; 1935; 132; 693.
3. McLEAN, D. — J. Inst. Metals; 1951-52; 80; 507.
4. McLEAN, D. — Creep and Fracture of Metals at High Temperature; Londres; 1956; 73.
5. McLEAN, D.; & FARMER, M.H. — J. Inst. Metals; 1954-55; 83; 1.
6. JONAS, J.J.; SELLERS, C.M.; & TEGART, W.J. Mcg. — Met. Rev.; 1969; 14; 1.
7. MYSHLAEV, M.M. — Proc. 4th Int. Conf. on Strength of Metals and Alloys; 1976; 3; 1037.
8. CUDDY, L.J. — Met. Trans.; 1970; 1; 395.
9. ROBINSON, S.L.; & SHERBY, O.D. — Acta Met.; 1969; 17; 109.
10. SHERBY, O.D.; KLUNDT, R.H.; & MILLER, A.K. — Met. Trans.; 1977; 8A; 843.
11. YOUNG, C.M.; ROBINSON, S.L.; & SHERBY, O.D. — Acta Met.; 1974; 23; 633.
12. PARKER, J.D.; & WILSHIRE, B. — Phil. Mag.; 1975; 32; 577.
13. MITRA, S.K.; & McLEAN, D. — Met. Sci. J.; 1967; 1; 192.
14. PONTIKIS, V.; & POIRIER, J. — Phil. Mag.; 1975; 32; 577.
15. FERREIRA, I.; & STANG, R.G. — Mat. Sci. and Eng.; 1979; 38; 169.
16. ASTM Designation E-122-7A; Annual Book of ASTM Standards; 1974; 207.
17. RAYMOND, L.; LUDERMANN, W.D.; JAFFE, N.; & DORN, J.E. — Trans. ASTM; 1961; 5; 111.
18. FERREIRA, I. — Ph. D. Dissertation; Univ. of Washington; 1978.
19. LUNDY, T.S.; & MURDOCK, J.F. — J. App. Phys.; 1962; 33; 1671.
20. FINE, M.F. — Rec. Sci. Inst.; 1957; 28; 643.