PMT3306 - Módulo “Mecanismos de deformação e de fratura em fluência” - Material de apoio

Cláudio Geraldo Schön

Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

25 de outubro de 2020

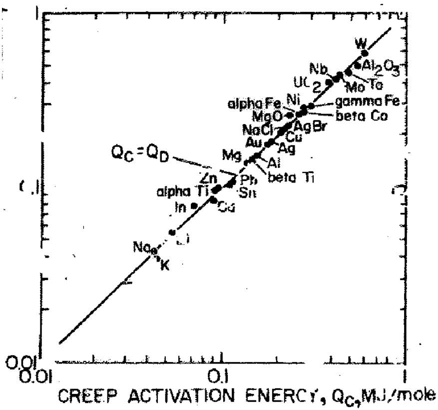
Equação de Mukherjee – Bird – Dorn

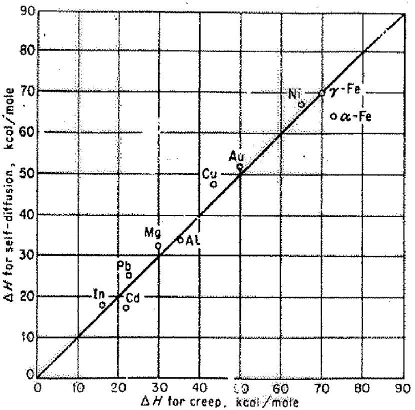
MBD

$$\dot{\varepsilon}_{min} = \frac{ADGb}{k_B T}\left(\frac{\sigma}{G}\right)^n \left(\frac{b}{d}\right)^p$$

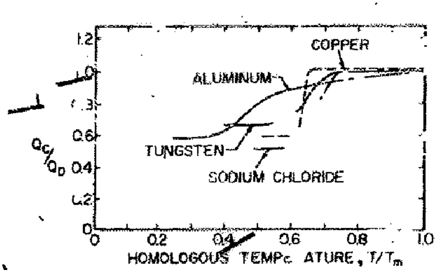
- D: difusividade (característica do mecanismo controlador da deformação plástica)
- G: módulo de cisalhamento
- b: módulo do vetor de Burgers (das discordâncias responsáveis pela deformação plástica)
- σ: tensão remota aplicada
- d: tamanho de grão
- A, p e n: parâmetros

Energia de ativação para deformação em fluência

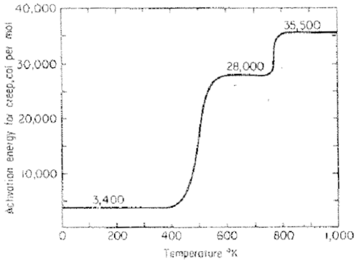




Difusividade



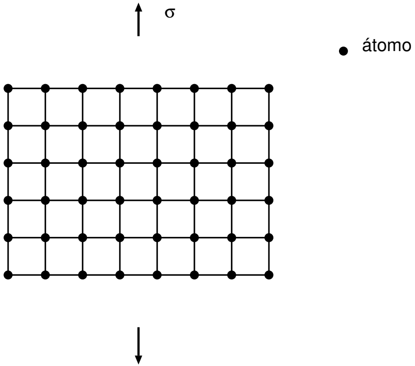
Monocristais de Alumínio

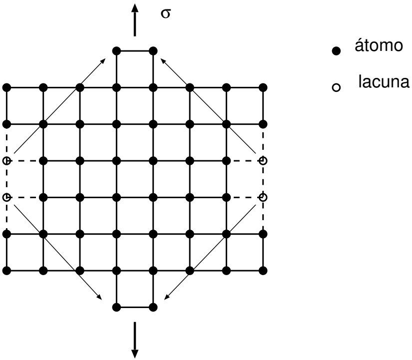


Mecanismos de fluência

a. Mecanismos difusionais.
b. Mecanismos baseados na superação de barreiras por ascensão de discordâncias (*dislocation creep* ou *power-law creep*).
c. Mecanismos baseados em escorregamento de discordâncias (*dislocation glide* ou *power-law breakdown*).
d. Mecanismos baseados em deslizamento de contornos de grão (*grain boundary sliding*).

Lacunas e fluência





Mecanismo de Nabarro - Herring

NH

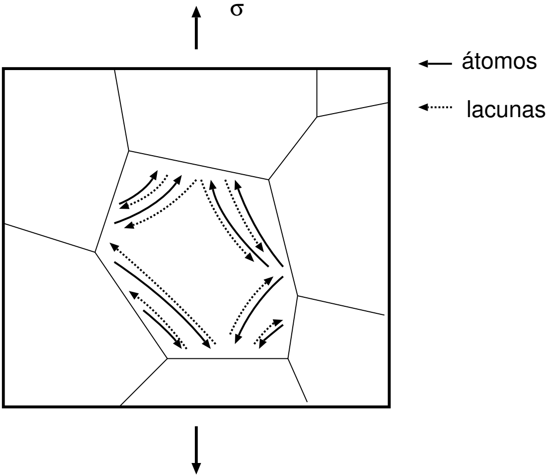
$$\vec{j} = -\left(\frac{n_L D}{k_B T}\right) \vec{\nabla} (\mu - \mu_h)$$

Conservação:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{j} = 0 \Rightarrow \nabla^2 (\mu - \mu_h) = 0$$

Trabalho de inserção de átomos:

$$\delta W = (\mu - \mu_h - \mu_0)\, \delta N$$



C. Herring, *J. Appl. Phys* 21 (1950) 437 – 445

Mecanismo de Nabarro - Herring

NH

$$\vec{j} = -\left(\frac{n_L D}{k_B T}\right)\vec{\nabla}\left(\mu - \mu_h\right)$$

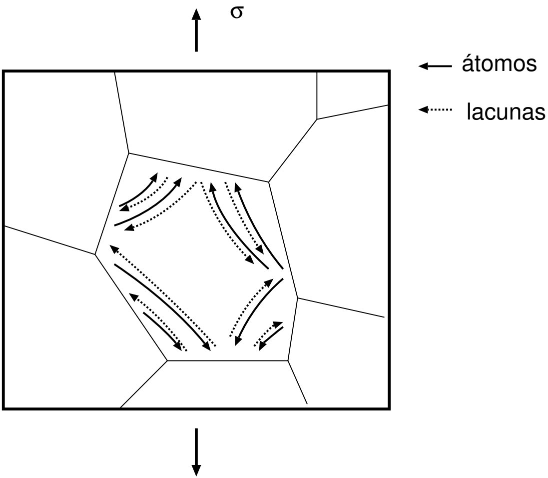
Conservação:

$$\vec{\nabla}\cdot\vec{j} = 0 \Rightarrow \nabla^2\left(\mu - \mu_h\right) = 0$$

Trabalho de inserção de átomos:

$$\delta W = \delta F - \mu_0 \delta N - \sigma_{33}\delta v$$

com $\delta F \approx \mu_0 \delta N$.



C. Herring, *J. Appl. Phys* 21 (1950) 437 – 445

Mecanismo de Nabarro - Herring

NH

$$\vec{j} = -\left(\frac{n_L D}{k_B T}\right)\vec{\nabla}\left(\mu - \mu_h\right)$$

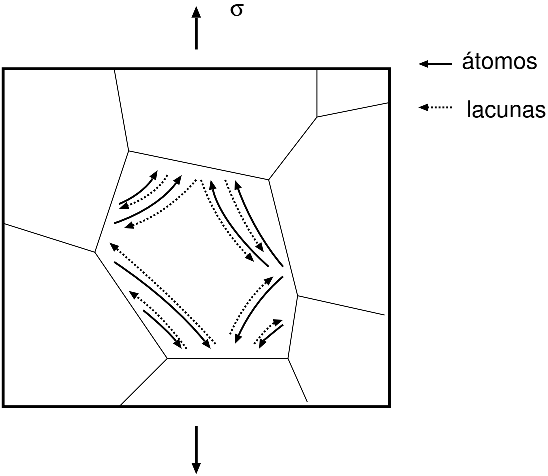
Conservação:

$$\vec{\nabla}\cdot\vec{j} = 0 \Rightarrow \nabla^2\left(\mu - \mu_h\right) = 0$$

ou seja

$$\mu - \mu_h = \mu_0 - \sigma_{33}\Omega_0$$

onde Ω_0 é o volume molar



C. Herring, *J. Appl. Phys* 21 (1950) 437 – 445

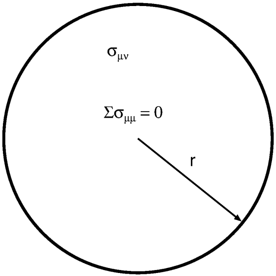
Mecanismo de Nabarro- Herring

Monocristal esférico

Em um ponto de coordenada $\vec{x}$ da superfície da esfera a componente normal de tração será dada por:

$$\sigma_{33} = \sum_{\mu\nu} \overline{\sigma}_{\mu\nu} \frac{x_\mu x_\nu}{r^2} \Leftarrow \sum_{\mu} x_\mu^2 = r^2$$

$$\mu - \mu_h = \mu_0 - \Omega_0 \sum_{\mu} \overline{\sigma}_{\mu\nu} \frac{x_\mu x_\nu}{r^2}$$



C. Herring, *J. Appl. Phys* 21 (1950) 437 – 445

Mecanismo de Nabarro- Herring

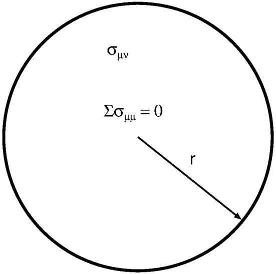
Monocristal esférico

Em um ponto de coordenada $\vec{x}$ da superfície da esfera a componente normal de tração será dada por:

$$\sigma_{33} = \sum_{\mu\nu} \overline{\sigma}_{\mu\nu} \frac{x_\mu x_\nu}{r^2} \Leftarrow \sum_{\mu} x_\mu^2 = r^2$$

O fluxo difusivo ao longo da superfície da esfera é dado por:

$$\vec{j}_n = \left(\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t} \Omega_0 \right) = \frac{2D}{k_B T} \sum_{\mu\nu} \frac{x_\mu x_\nu}{r^3}$$



C. Herring, *J. Appl. Phys* 21 (1950) 437 – 445

Mecanismo de Nabarro- Herring

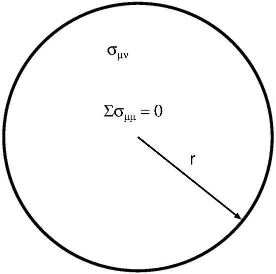
Monocristal esférico

Em um ponto de coordenada $\vec{x}$ da superfície da esfera a componente normal de tração será dada por:

$$\sigma_{33} = \sum_{\mu\nu} \overline{\sigma}_{\mu\nu} \frac{x_\mu x_\nu}{r^2} \Leftarrow \sum_{\mu} x_\mu^2 = r^2$$

usando a identidade $n_L \Omega_0 = 1$:

$$\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t} = \sum_{\mu\nu} \dot{\gamma}_{\mu\nu} \frac{x_\mu x_\nu}{r}$$



C. Herring, *J. Appl. Phys* 21 (1950) 437 – 445

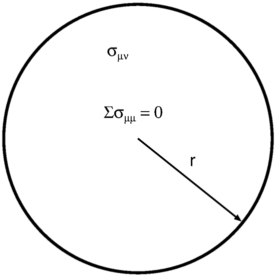
Mecanismo de Nabarro- Herring

Monocristal esférico

Em um ponto de coordenada $\vec{x}$ da superfície da esfera a componente normal de tração será dada por:

$$\sigma_{33} = \sum_{\mu\nu} \overline{\sigma}_{\mu\nu} \frac{x_\mu x_\nu}{r^2} \Leftarrow \sum_{\mu} x_\mu^2 = r^2$$

$$\dot{\gamma}_{\mu\nu} = \frac{2D\Omega_0}{k_B T r^2} \overline{\sigma}_{\mu\nu}$$



C. Herring, *J. Appl. Phys* 21 (1950) 437 – 445

Mecanismo de Nabarro- Herring

Monocristal esférico

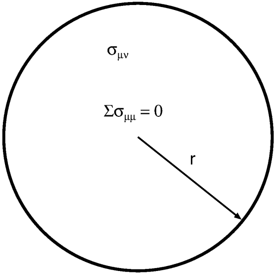
Em um ponto de coordenada $\vec{x}$ da superfície da esfera a componente normal de tração será dada por:

$$\sigma_{33} = \sum_{\mu\nu} \overline{\sigma}_{\mu\nu} \frac{x_\mu x_\nu}{r^2} \Leftarrow \sum_\mu x_\mu^2 = r^2$$

$$\dot{\varepsilon}_{min} \approx \frac{7\sigma D b^3}{k_B T d^2}$$

ou seja:

$$n = 1 \qquad p = 2$$



C. Herring, *J. Appl. Phys* 21 (1950) 437 – 445

Mecanismo de Coble

Difusão em contornos de grão

$$\dot{\varepsilon}_{min} \approx \frac{50 D^* \sigma b^4}{k_B T d^3}$$

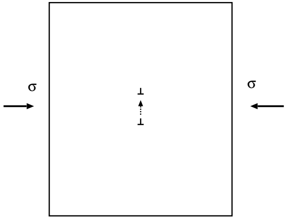
ou seja:

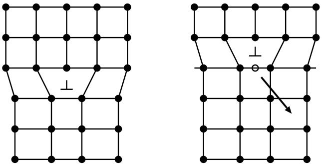
$$n = 1 \qquad p = 3$$

R. L. Coble, *J. Appl. Phys.* **34** (1963) pp. 1679 – 1682.

Mecanismo de Harper - Dorn

Casos extremos





$$\dot{\varepsilon}_{min} \approx \frac{Db\sigma}{k_B T}$$

$$n = 1 \qquad p = 0$$

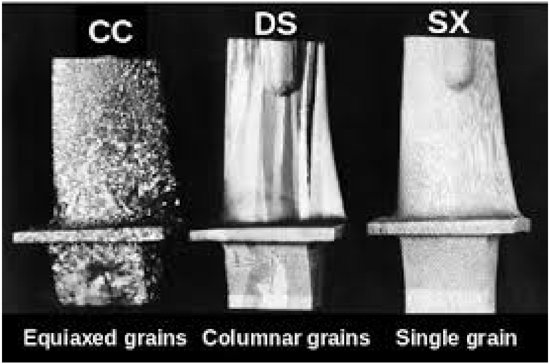
J. G. Harper, J. E. Dorn, *Acta Metall.* **5** (1957) pp. 654 – 665 e J. G. Harper, L. A. Shepard, J. E. Dorn, *Acta Metall.* **6** (1958) pp. 509 – 518.

Resumo dos mecanismos difusionais

- Regime de baixas tensões $\rightarrow$ condições mais usuais de operação
    - Temperaturas homólogas altas $\rightarrow$ NH
    - Temperaturas homólogos baixas $\rightarrow$ Coble
- Supressão de NH e Coble $\rightarrow$ Harper - Dorn (questionável)

Aplicação

Palhetas de turbina



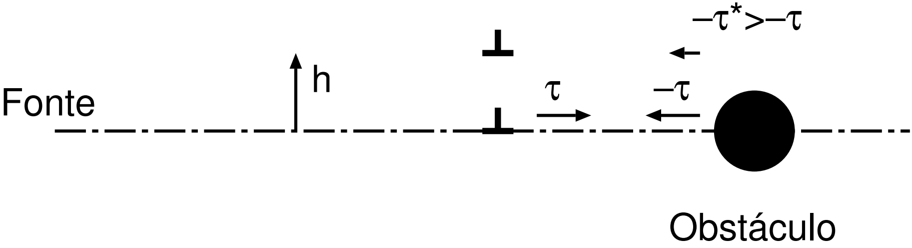

(a)


(b)

Mecanismo de Weertmann

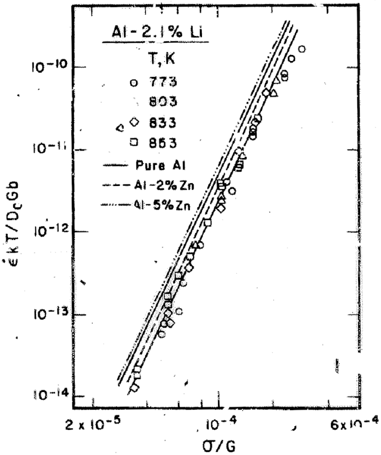
$$\dot{\varepsilon}_{min} \approx \frac{ADGb}{k_B T}\left(\frac{\sigma}{G}\right)^5$$

portanto, $n = 5$, $p = 0$.



J. Weertman, *J. Appl. Phys.* 26 (1955) pp. 1213 – 1217.

Exemplos



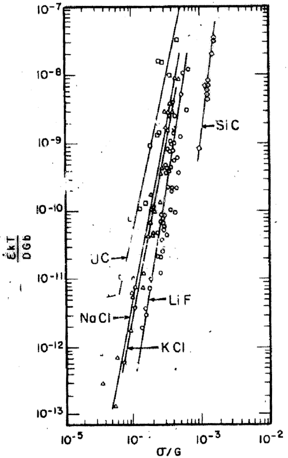
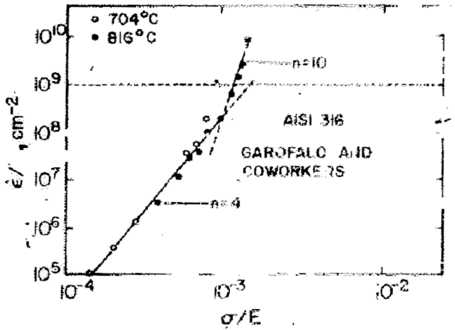
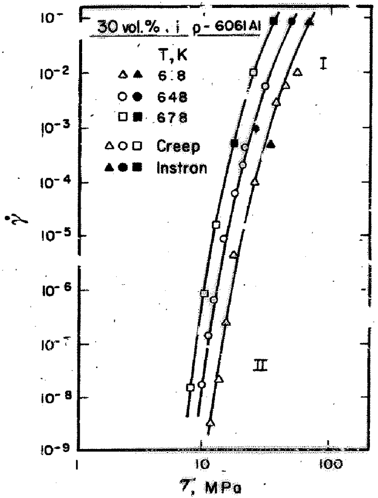


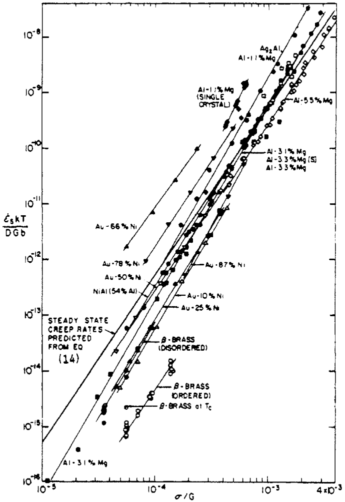
Figure 13.4b

Quebra da lei de potência





Escoamento viscoso



- Em soluções sólidas (D = coeficiente de interdifusão)
- $n \approx 3$
- Componente de fricção no escorregamento de discordâncias

Efeito de dispersões de precipitados

Tensão de limiar (σ_0)

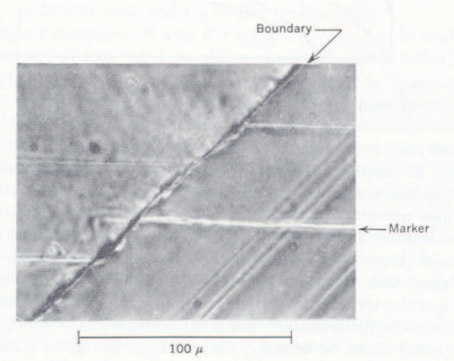
$$\dot{\varepsilon}_{min} = A\frac{DGb}{k_B T}\left(\frac{\sigma - \sigma_0}{G}\right)^n$$

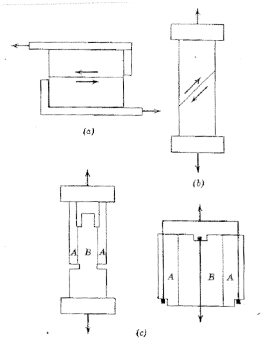
Rao *et al.*

$$\dot{\varepsilon}_{min} = 8,3 \times 10^8 \frac{DGb}{k_B T}\left[\exp\left(-104\sqrt{\frac{b}{\lambda}}\right)\right]\left(\frac{\sigma - \sigma_0}{E}\right)^5$$

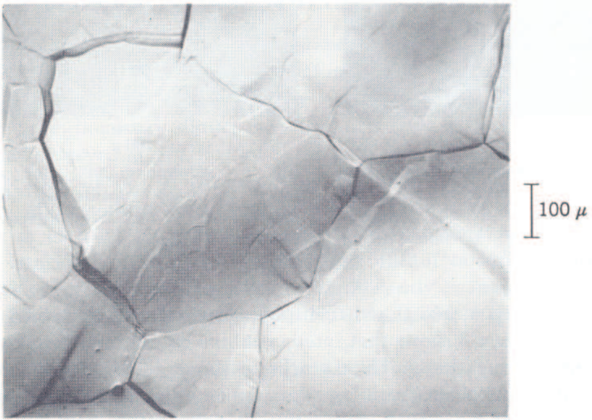
onde λ representa a distância média entre partículas.

Deslizamento de contornos de grão

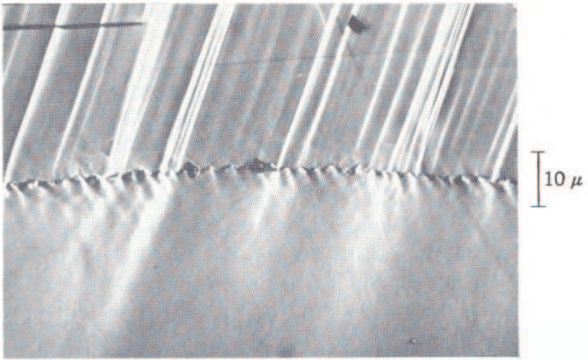




Deslizamento de contornos de grão



Deslizamento de contornos de grão



Vetor deslocamento

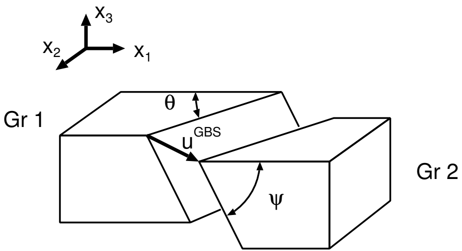
$$u_1^{\mathrm{GBS}} = \frac{u_2^{\mathrm{GBS}}}{\tan\psi} + \frac{u_3^{\mathrm{GBS}}}{\tan\theta}$$

$$\varepsilon_{\mathrm{GBS}} = n_\ell \overline{u}_1^{\mathrm{GBS}}$$

ou ainda

$$\varepsilon_{\mathrm{GBS}} = k' n_\ell \overline{u}_2^{\mathrm{GBS}}$$

onde $k' \approx 1,5$ é uma constante.



Desenvolvimento

Introduzindo a variável ξ:

$$\xi = \frac{\varepsilon_{\mathrm{GBS}}}{\varepsilon_t}$$

onde ε_t é a deformação total de fluência, e supondo que:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_g + \varepsilon_{\mathrm{GBS}}$$

onde ε_g é a parcela intergranular, temos que:

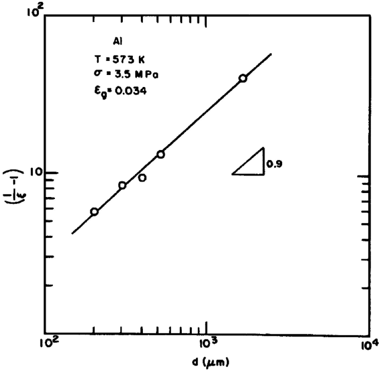
$$\left(\frac{1}{\xi} - 1\right) = \frac{\varepsilon_g}{\varepsilon_{\mathrm{GBS}}} = \frac{\dot{\varepsilon}_g}{\dot{\varepsilon}_{\mathrm{GBS}}}$$

Postulamos que tanto a parcela intergranular, quanto a devida ao GBS são da forma da equação MBD, e obtemos:

$$\left(\frac{1}{\xi} - 1\right) = \frac{A_g}{A_{\mathrm{GBS}}} \left(\frac{d}{b}\right)^{p_{\mathrm{GBS}} - p_g} \left(\frac{\sigma}{G}\right)^{n_g - n_{\mathrm{GBS}}} \frac{D_g}{D_{\mathrm{GBS}}}$$

Resultados de Langdon

Alumínio

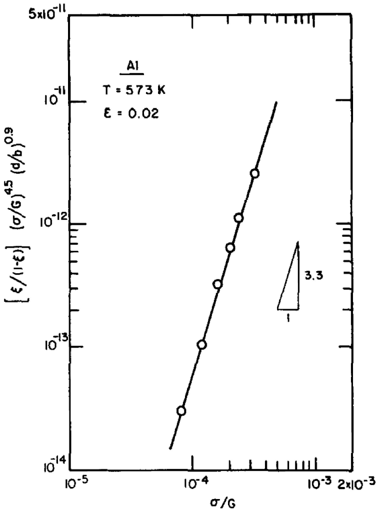


- $p_{\mathrm{GBS}} = 0{,}9$
- $n_{\mathrm{GBS}} \approx 3{,}5$
- $Q_{\mathrm{GBS}} = 145\ \mathrm{kJ\ mol^{-1}} \rightarrow$ autodifusão de alumínio.

T. G.Langdon, *J. Mater. Sci.* **41** (2006) 597 – 609.

Resultados de Langdon

Alumínio

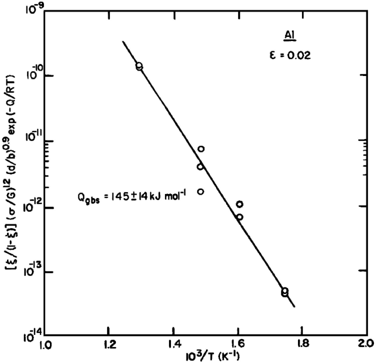


- p_{GBS} = 0,9
- $n_{\mathrm{GBS}} \approx$ 3,5
- Q_{GBS} = 145 kJ mol^{-1} $\rightarrow$ autodifusão de alumínio.

T. G.Langdon, *J. Mater. Sci.* **41** (2006) 597 – 609.

Resultados de Langdon

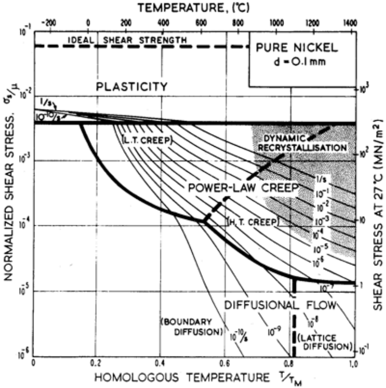
Alumínio

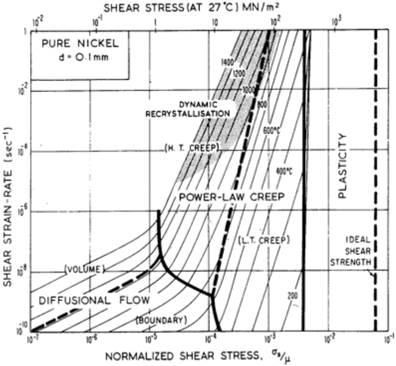


- p_{GBS} = 0,9
- $n_{\mathrm{GBS}} \approx$ 3,5
- Q_{GBS} = 145 kJ mol^{-1} $\rightarrow$ autodifusão de alumínio.

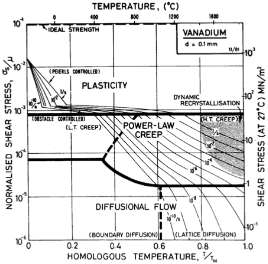
T. G.Langdon, *J. Mater. Sci.* **41** (2006) 597 – 609.

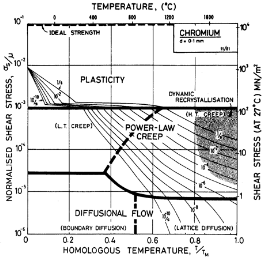
Mapas de Weertmann – Ashby

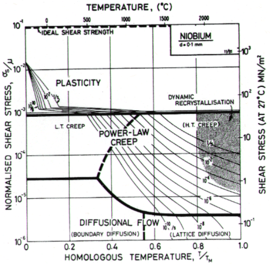




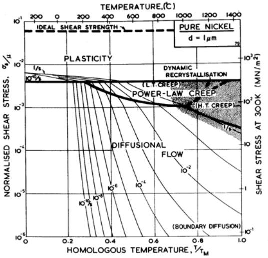
Comparação

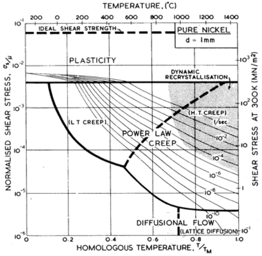

TEMPERATURE, (°C)
VANADIUM
d = 0.1 mm
IDEAL STRENGTH
(PEIERLS CONTROLLED)
PLASTICITY
DYNAMIC RECRYSTALLISATION
(OBSTACLE CONTROLLED)
(L.T. CREEP)
POWER-LAW CREEP
(H.T. CREEP)
DIFFUSIONAL FLOW
(BOUNDARY DIFFUSION)
(LATTICE DIFFUSION)
NORMALISED SHEAR STRESS, σs/μ
SHEAR STRESS (AT 27°C) MN/m²
HOMOLOGOUS TEMPERATURE, T/TM

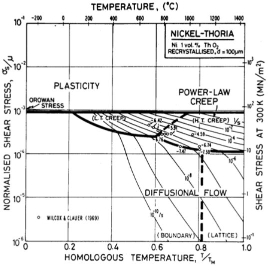

TEMPERATURE, (°C)
CHROMIUM
d = 0.1 mm
IDEAL STRENGTH
PLASTICITY
DYNAMIC RECRYSTALLISATION
(L.T. CREEP)
POWER-LAW CREEP
(H.T. CREEP)
DIFFUSIONAL FLOW
(BOUNDARY DIFFUSION)
(LATTICE DIFFUSION)
NORMALISED SHEAR STRESS, σs/μ
SHEAR STRESS (AT 27°C) MN/m²
HOMOLOGOUS TEMPERATURE, T/TM


TEMPERATURE, (°C)
NIOBIUM
d = 0.1 mm
IDEAL SHEAR STRENGTH
PLASTICITY
DYNAMIC RECRYSTALLISATION
L.T. CREEP
POWER-LAW CREEP
(H.T. CREEP)
DIFFUSIONAL FLOW
(BOUNDARY DIFFUSION)
(LATTICE DIFFUSION)
NORMALISED SHEAR STRESS, σs/μ
SHEAR STRESS (AT 27°C) MN/m²
HOMOLOGOUS TEMPERATURE, T/TM

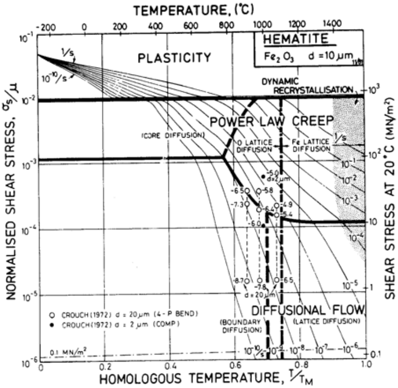
Efeito de variáveis microestruturais

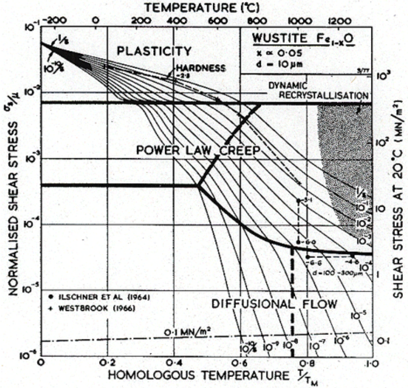




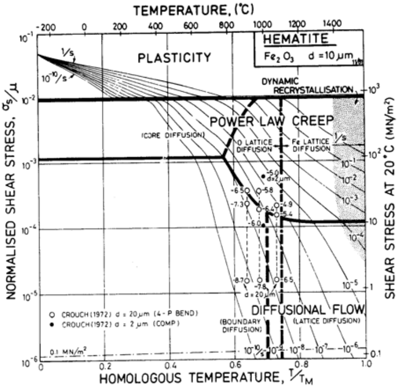


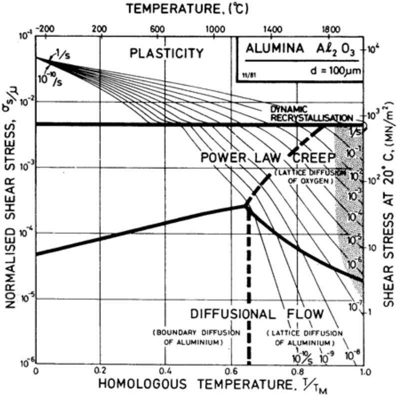
Materiais cerâmicos





Materiais cerâmicos



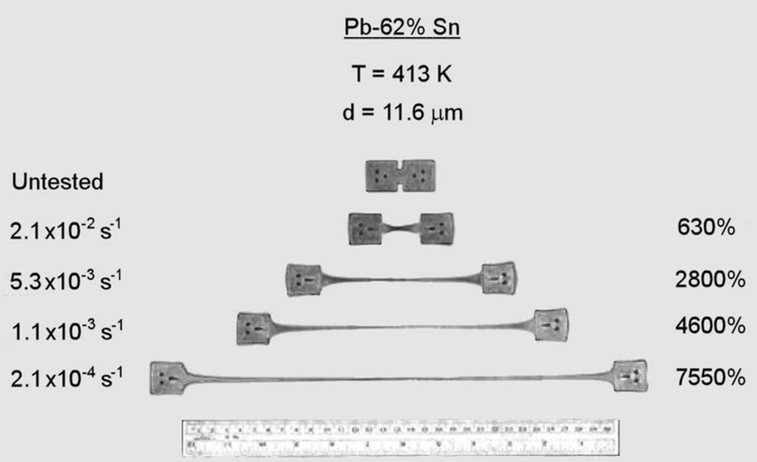


Comportamento superplástico

Ductilidade é limitada pelo surgimento da estricção. Se for possível atrasar o início da estricção, a ductilidade aumenta $\rightarrow$ materiais superplásticos. Fatores que induzem:

- faixa de taxa de deformaçãoo bem definida (tipicamente 10^{-4} $\leq \dot{\varepsilon} \leq 10^{-2}$ s^{-1}),
- faixa de temperaturas bem definida (tipicamente $\geq \tau_H = 0,4$) e
- para condições microestruturais bem definidas (tamanhos de grão micro- ou nanocristalinos ou microestruturas lamelares muito refinadas).

Superplasticidade



M. Kawazaki, T. G. Langdon *J. Mater. Sci.* **51** (2016) 19 – 32.

Sensibilidade à taxa de deformação e estricção

Das definições:

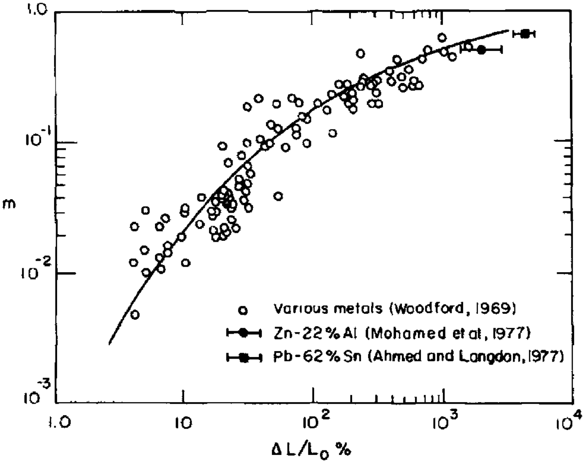
$$\sigma^r = \frac{F}{A} \qquad \text{e} \qquad \dot{\varepsilon}^r = \frac{1}{\ell}\frac{\mathrm{d}\ell}{\mathrm{d}t} = -\frac{1}{A}\frac{\mathrm{d}A}{\mathrm{d}t}$$

Assim

$$-\frac{\mathrm{d}A}{\mathrm{d}t} = A\dot{\varepsilon}^r = A^{1-\frac{1}{m}}\left(\frac{F}{C}\right)^{\frac{1}{m}} \Rightarrow -\frac{\mathrm{d}A}{\mathrm{d}t} = \left(\frac{F}{C}\right)^{\frac{1}{m}}\left(\frac{1}{A^{\frac{(1-m)}{m}}}\right)$$

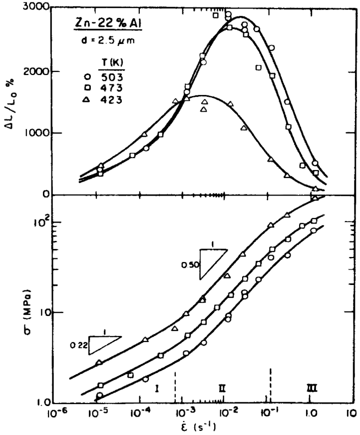
$\Rightarrow$ quando $m > 0,3 \rightarrow$ superplasticidade.

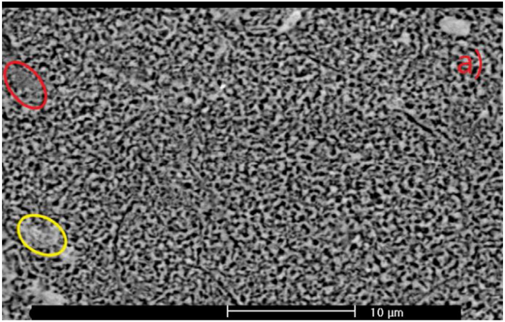
Correlação superplasticidade vs. *m*



T. G. Langdon *J. Mater. Sci* **44** (2009) 5998 – 6010.

Zn – 22Al

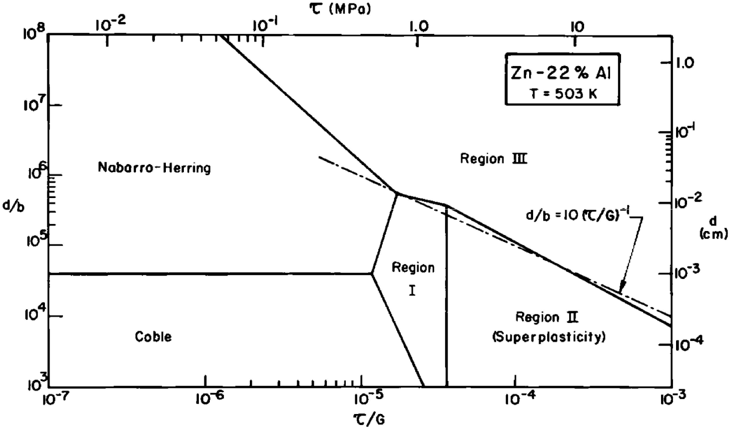




M. R. Azpeitia, E. E. Martínez Flores, J. L. Hernandez Rivera, G. T. Villaseñor, *J. Mater. Res. Tech.* **9** (2020) 5610 – 5618.

T. G.Langdon, *J. Mater. Sci.* **41** (2006) 597 – 609.

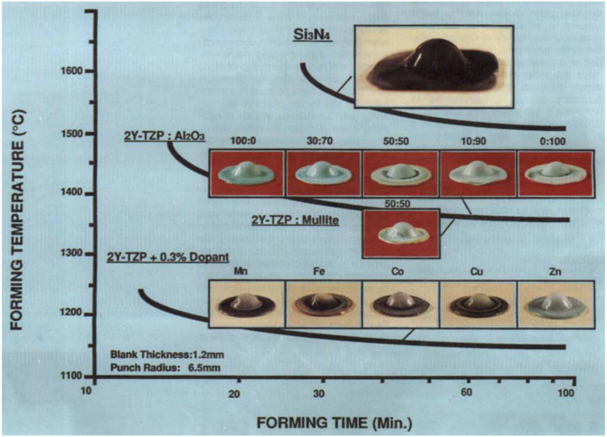
Zn – 22Al



T. G.Langdon, *J. Mater. Sci.* **41** (2006) 597 – 609.

Superplasticidade em cerâmicas

Conformação superplástica



I.-W. Chen, L. A. Xue *J. Amer. Cer. Soc.* **73** (1990) 2585 – 2609.

Superplasticidade em cerâmicas

Microestruturas

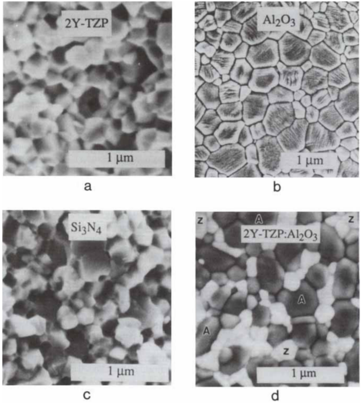


Fig. 3. Scanning electron microscopy micrographs of ultrafine grains of superplastic ceramics: (a) 2Y-TZP, (b) alumina, (c) silicon nitride, and (d) 2Y-TZP/alumina at equal volume fraction.

I.-W. Chen, L. A. Xue *J. Amer. Cer. Soc.* **73** (1990) 2585 – 2609.

Superplasticidade em cerâmicas

Alumina

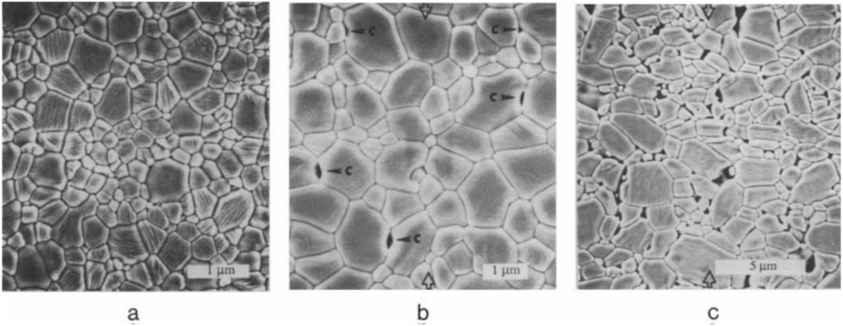
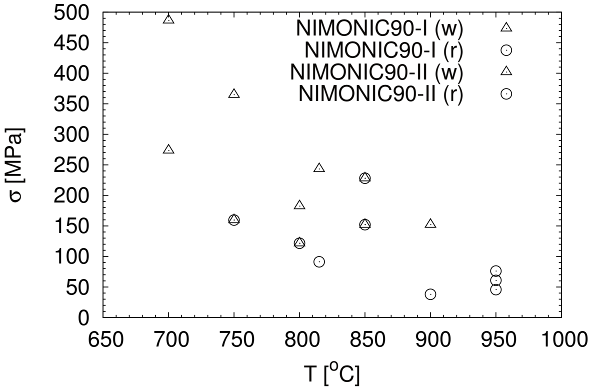


Fig. 9. Microstructure of pure alumina: (a) as sintered at 1250°C; (b) deformed in compression at 1250°C (strain rate of 1.5×10^{-5} s^{-1}; total strain of 0.3) with compression axis shown by hollow arrows and cavities by solid arrows; and (c) same as (b) but deformed at 1400°C (strain rate of 2.4×10^{-4} s^{-1}; total strain of 0.68).

I.-W. Chen, L. A. Xue *J. Amer. Cer. Soc.* **73** (1990) 2585 – 2609.

Tipos de cavidades

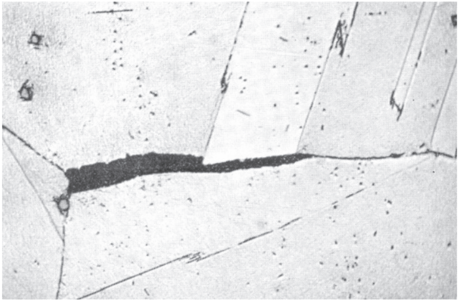


- Cavidades tipo w
- Cavidades tipo r

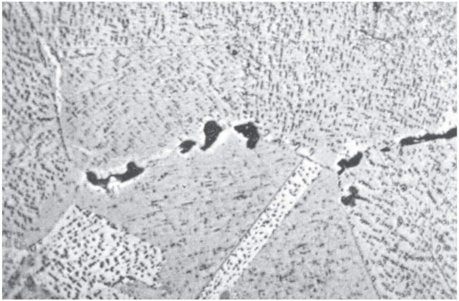
D. McLean “A note on the metallography of cracking during creep” *JIM* 85 (1956) pp. 468 – 472.

Exemplos de cavidades

Cavidade tipo w



Cavidade tipo r



D. McLean “A note on the metallography of cracking during creep” *JIM* 85 (1956) pp. 468 – 472.