

FLUÊNCIA

Aumento da temperatura

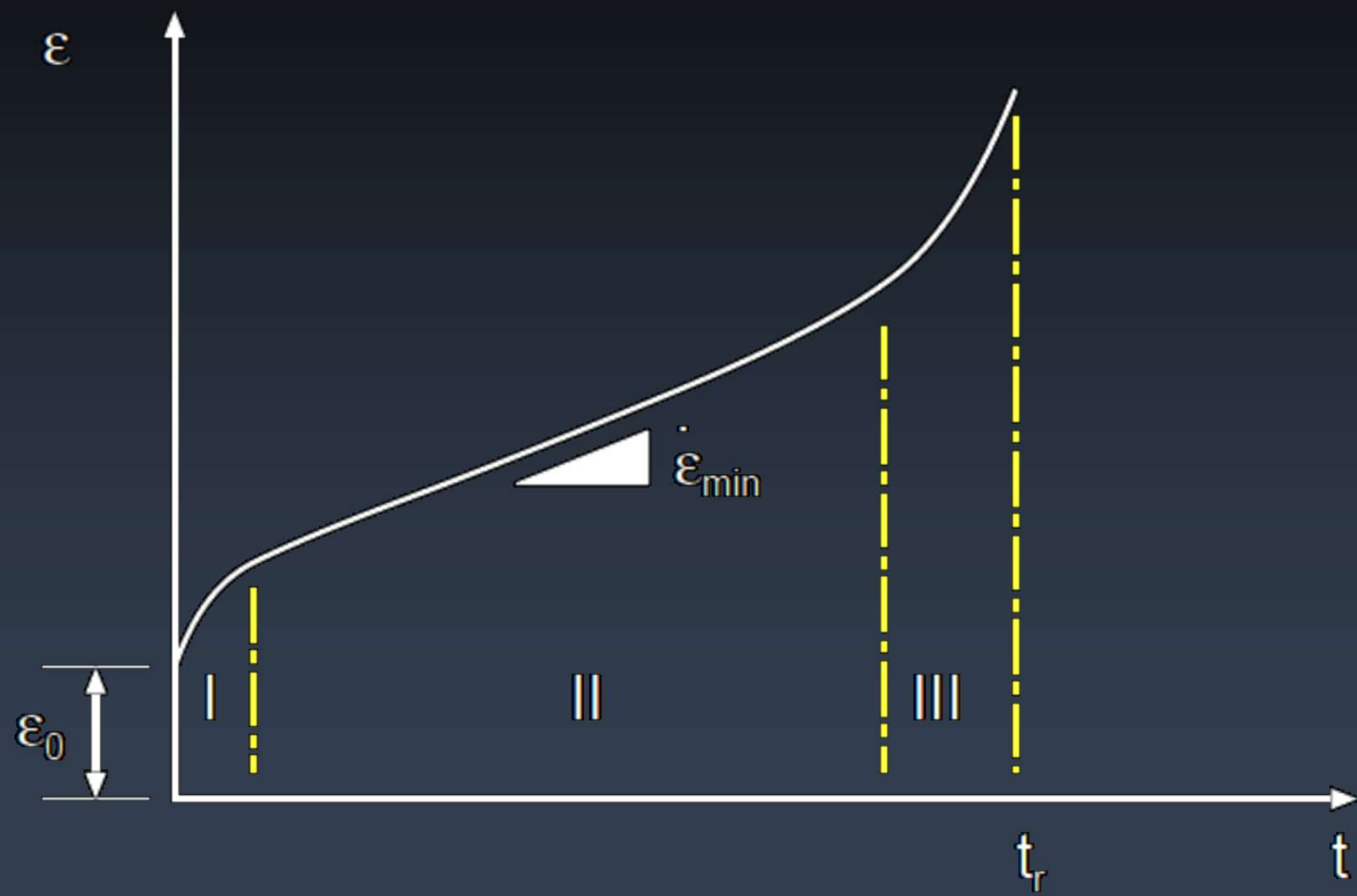
- Aumento da temperatura aumenta o número de lacunas em equilíbrio
- Mobilidade das lacunas aumenta
- Lacunas têm seu próprio campo de tensões, que pode interagir com o campo de tensões externo
- Mecanismo ligados aos contornos de grão começam a ser ativados

Aumento da temperatura

- Fenômenos associados à fluência são percebidos quanto

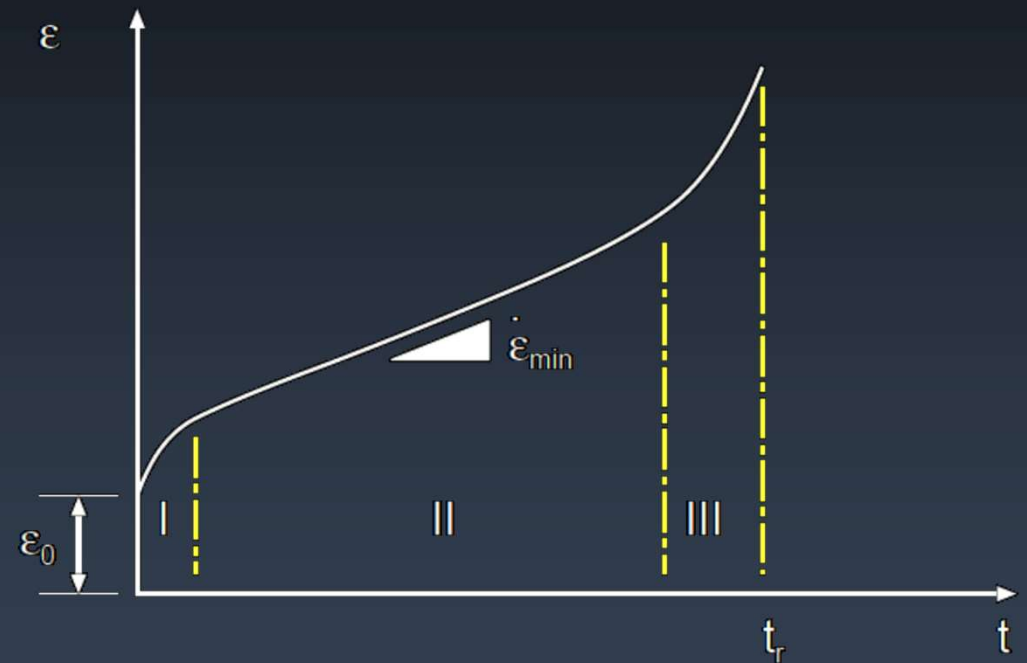
$$\tau_H > 0,4$$

- Esses fenômenos podem ocorrer microscopicamente a qualquer temperatura



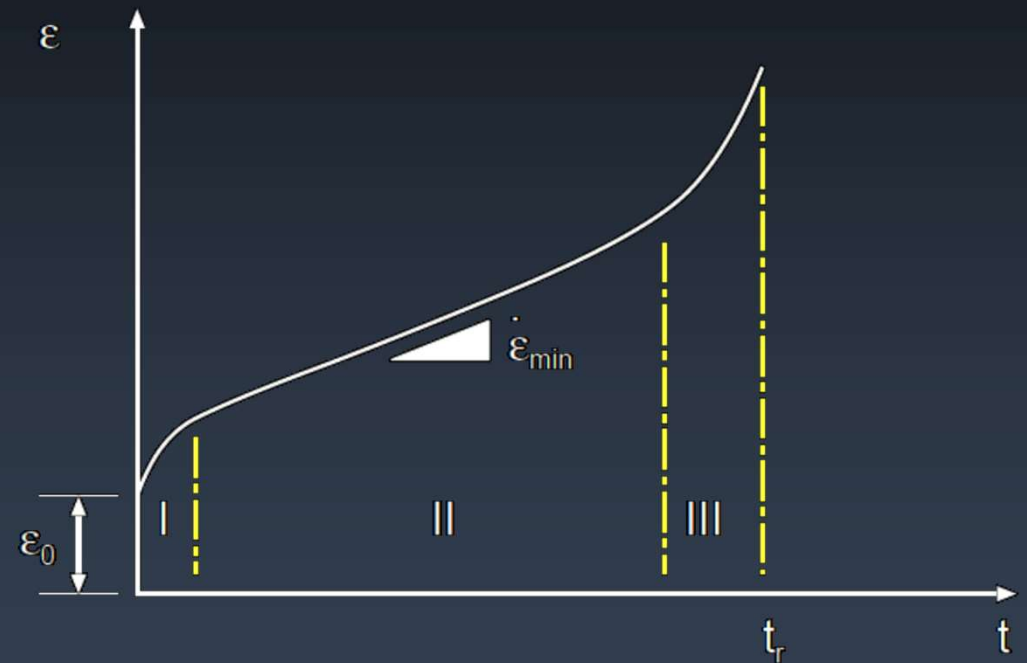
Curva do ensaio de fluência

- Estágio I – Transiente ou primário
- Duração limitada
- Redução progressiva da taxa de deformação
- Em geral pode ocorrer em um tempo muito curto
- Chega a não ser detectado na curva experimental



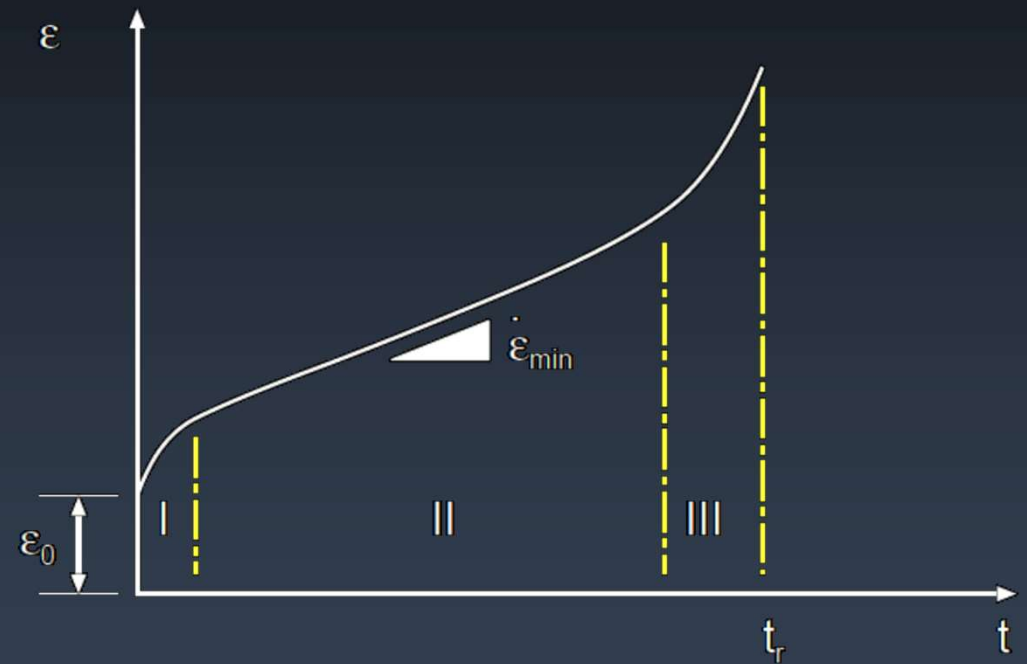
Curva do ensaio de fluência

- Estágio II – Estacionário ou Secundário
- Taxa de deformação constante
- Maior parte da vida do material em solicitação de fluência



Curva do ensaio de fluência

- Estágio III – Terciário
- Taxa de deformação volta a aumentar
- Precede a fratura catastrófica



Ensaio de fluência

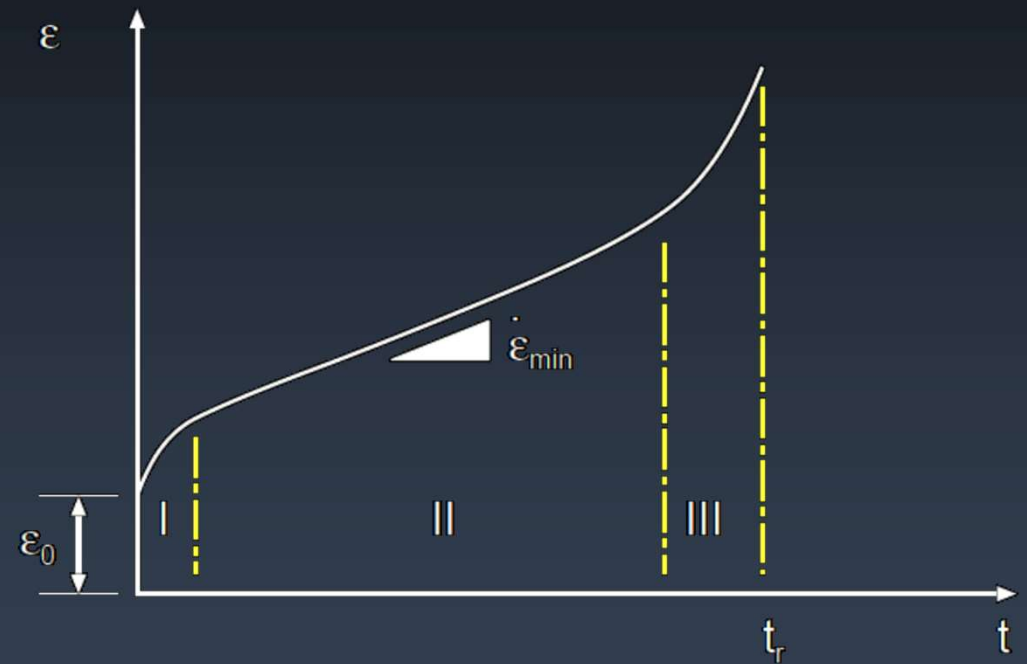
- Condições isotérmicas
- Carga ou tensão real constante
- Longa duração (2.000 a 10.000 horas)
- Carga constante: caracterização tecnológica, obtenção de dados para projeto
- Tensão real constante: Investigação científica dos materiais.
- Investigação de peças que sofreram fenômenos de fluência durante o uso (investigação *post-mortem*)

Ensaio de fluência

Como você garante a aplicação de uma tensão real constante?

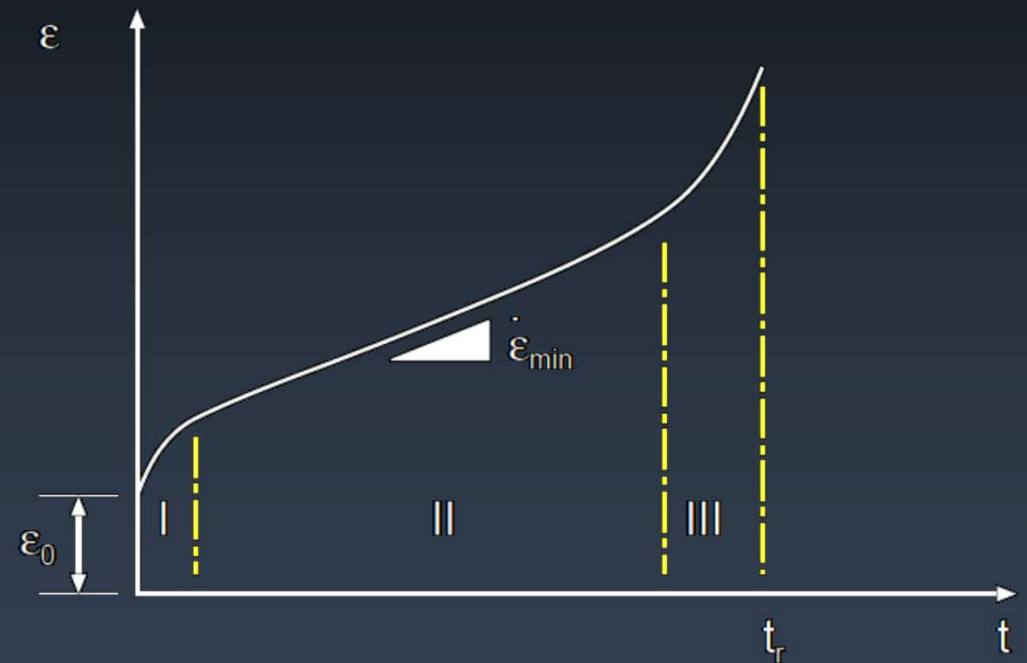
Ensaio de Fluência

- Parâmetros:
- Tempo de ruptura em fluência
- Obtido no ensaio de ruptura em fluência
- Ensaio de curta duração
- Materiais que precisam sobreviver por tempo limitado em alta temperatura



Ensaio de Fluência

- Parâmetros:
- Taxa mínima de fluência
- Obtido no ensaio de fluência (2.000 a 10.000 h)
- Ensaio para estudo do estágio II (raramente até ruptura)
- Materiais que precisam sobreviver por tempo muito longo em alta temperatura



Ensaio de fluência

- Relações empíricas
- Objetivo: descrever a deformação
- E. N. da C. Andrade, 1910:
- k e β são constantes, ε_0 é a deformação elástica instantânea
- Garofalo, 1960

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \left(1 + \beta t^{\frac{1}{3}} \right) e^{kt}$$

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + \varepsilon_t \left(1 - e^{-rt} \right) + \dot{\varepsilon}_{min} t$$

Não descrevem o estágio terciário

Ensaio de fluência

- Relações empíricas:
- Monkman e Grant
- Relaciona tempo de ruptura com taxa mínima
- $0,77 < m < 0,93$ e $0,48 < B < 1,3$
- Tempo de ruptura cai com o aumento da taxa de fluência

$$\log_{10} t_r + m \log_{10} \dot{\epsilon}_{min} = B$$

Ensaio de fluência

- Lei de Cottrell (1952)
- Baixas temperaturas
- Descreve casos especiais:
- $n'=0$ – taxa de deformação constante (estado estacionário)
- $n' = 1$ a deformação é proporcional a $\ln(t)$ – temperaturas e tensões muito baixas
- $n' = 2/3$ – a deformação fica proporcional a $t^{1/3}$, que corresponde ao modelo de Andrade

$$\dot{\epsilon} = A t^{-n'}$$

Energia de ativação

- Fluência é dominada por processos termicamente ativados

$$\dot{\epsilon}_{min} = A \exp \left[-\frac{\Delta H}{k_B T} \right]$$

Sherby, Dorn e Orr: energia de ativação para fluência em altas temperaturas é igual à energia de ativação de autodifusão.

Energia de ativação de autodifusão é a entalpia de formação e migração de lacunas

Processo controlador envolve a criação e migração de lacunas. (exemplo: escalada de discordâncias)

Energia de ativação

- Método de obtenção: comparação de dados em temperaturas próximas.
- A e DH podem ser consideradas independentes de temperatura nestas condições

$$\dot{\varepsilon}_1 \exp \left[\frac{\Delta H}{k_B T_1} \right] = A = \dot{\varepsilon}_2 \exp \left[\frac{\Delta H}{k_B T_2} \right] \Rightarrow$$
$$\Delta H = k_B \left(\ln \frac{\dot{\varepsilon}_1}{\dot{\varepsilon}_2} \right) \left(\frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \right)$$

- Correlação em escala de tempos efetivos, compensados pela variação de temperatura

$$\theta = t \exp \left[\frac{\Delta H}{k_B T} \right]$$

Critérios de projeto

- Taxa mínima de fluência é o critério mais usado nos projetos:
- Tensão necessária para $\dot{\epsilon}_{min} = 0,000001h^{-1}$ (1% em 10.000 h) – usado no projeto de turbinas de aviões a jato
- Tensão necessária para $\dot{\epsilon}_{min} = 0,0000001h^{-1}$ (1% em 100.000 h) – usado no projeto de turbinas de usinas termoelétricas

Como testar ou especificar a vida de um material recém desenvolvido?

Extrapolação

- Grant e Buckling (1950)

$$\log_{10} t = \log_{10} \theta + \frac{M}{k_B} \frac{\Delta H}{T}$$

Extrapolação

- *Larson-Miller*
- Analisaram o método de Grant e Buckling
- Dados do log de t_r realmente são lineares com $1/T$
- Comparados com dados obtidos para diferentes níveis de tensão os dados convergem para um ponto <0 nas ordenadas
- Coeficiente angular das retas depende só da tensão
- O ponto de convergência é $\log_{10}\theta$ e independe da tensão

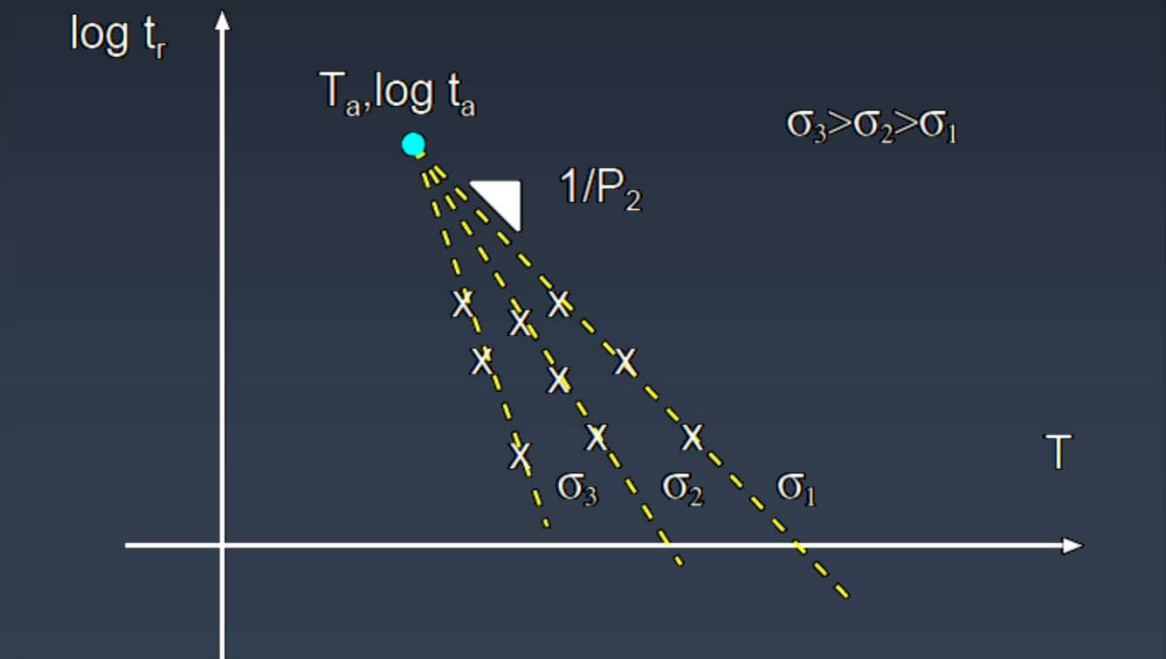
$$T (\log_{10} t_r + C_1) = P_1$$

$$T (C_1 - \dot{\epsilon}_{min}) = P_1$$

Extrapolação

- Manson-Haferd
- Utiliza um parâmetro a mais do que LM

$$\frac{T - T_a}{\log_{10} t_r - \log_{10} t_a} = P_2$$



Estados triaxiais de tensão

- Casos reais:
- Tubulações de paredes grossas sob pressões isostáticas internas
- Tubulações sob tensões biaxiais

Estados triaxiais de tensões

- Soderberg, 1960
- Hipóteses:
 1. As direções principais dos tensores de tensão e de deformação coincidem
 2. Volume conservado na deformação plástica
 3. Máximas deformações angulares proporcionais às máximas tensões cisalhantes
 4. Escoamento obedece ao critério de Von Mises.

Estados triaxiais de tensão

- Hipótese 1 raramente não se observa;
- Hipótese 2: $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0$
- Hipótese 3:

$$\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\sigma_1 - \sigma_2} = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\sigma_1 - \sigma_3} = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_3}{\sigma_2 - \sigma_3} = C$$

Estados triaxiais de tensão

$$\varepsilon_1 = \frac{2C}{3} \left[\sigma_1 - \frac{1}{2} (\sigma_2 + \sigma_3) \right]$$

$$\varepsilon_2 = \frac{2C}{3} \left[\sigma_2 - \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_3) \right]$$

$$\varepsilon_3 = \frac{2C}{3} \left[\sigma_3 - \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_2) \right]$$

- Hipótese 4:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sqrt{2}}{2} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Estados triaxiais de tensão

$$\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_1} = \frac{2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3}{2\bar{\sigma}}$$

- Estado triaxial de tensões –
deformação efetiva será definida por:

$$\varepsilon_1 = \frac{2C}{3} \left[\sigma_1 - \frac{1}{2} (\sigma_2 + \sigma_3) \right]$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} \left[(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\varepsilon_1 = \frac{2C}{3} \bar{\sigma} \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_1}$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{2}{3} C \bar{\sigma}$$

$$\text{e } \varepsilon_1 = \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_1} \bar{\varepsilon}$$

Estados triaxiais de tensão

- Se a taxa de deformação mínima em um estado uniaxial é conhecida e função de σ e T :

$$\dot{\epsilon}_{min} = \dot{\epsilon}_{min}(\sigma_1, T)$$

- Derivando-se no tempo a tensão constante:

$$\dot{\epsilon}_1 = \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_1} \dot{\epsilon}_{min}(\sigma_1, T)$$

Podem-se calcular as tensões principais a partir dos dados do ensaio uniaxial

Relaxação de tensões

- Juntas parafusadas
- Juntas montadas por interferência
- Tensões residuais

A equação resulta numa queda de tensão com o aumento do tempo e é mais intensa nos pontos de concentração de tensões.

Para uma deformação total constante:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl} = \frac{\sigma}{E} + \varepsilon_{pl}$$

$$\dot{\varepsilon}_{el} = -\dot{\varepsilon}_{min}(\sigma, T)$$

$$\frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} = -\dot{\varepsilon}_{min}(\sigma, T)$$

MECANISMOS DE DEFORMAÇÃO E FRATURA EM FLUÊNCIA

Descrição do fenômeno

- Análise apresentada permite obter dados de projeto
- É necessário dominar o fenômeno e conhecer os mecanismos

Equação de Mukherjee-Dorn-Bird (MBD)

- D é o coeficiente de difusão
- G é o módulo de cisalhamento
- b é o módulo do vetor de Burgers
- σ é a tensão remota aplicada
- d é o tamanho de grão
- A , n e p são constantes que dependem do material e mecanismo controlador

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

Equação MBD

- Permite sistematizar uma série de observações experimentais do estágio II:
 - Efeitos de temperatura, tensão e tamanho de grão são isoláveis (desde que o mesmo mecanismo esteja agindo)
 - Efeito de temperatura está embutido em D
 - Efeitos de tensão e TG são leis de potência
 - p e n podem ser determinados em gráficos log x log
 - Mecanismos controladores podem ser inferidos a partir dos valores de A , p e n .

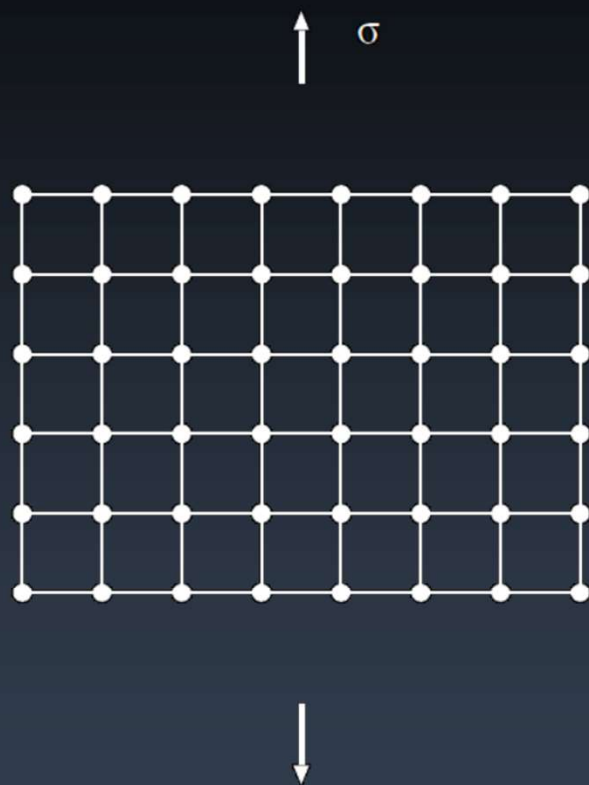
Mecanismos de fluência

- Mecanismos difusionais
- Superação de barreiras por ascensão de discordâncias
- Escorregamento de discordâncias
- Deslizamento de contornos de grão

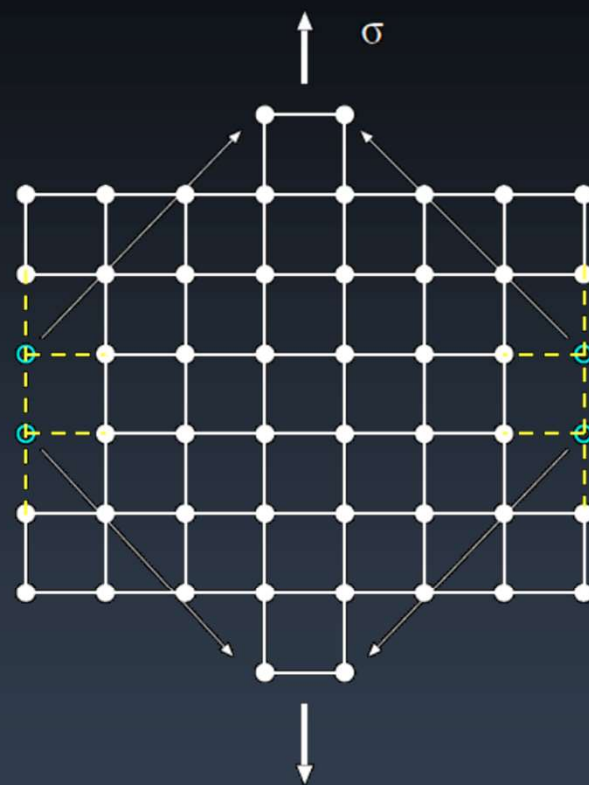
Mecanismos difusionais

Mecanismo de Nabarro-Herring

- Lacunas são produzidas nas superfícies paralelas à aplicação do esforço e migram para as superfícies perpendiculares
- Tomando superfícies externas como referência, as distâncias de difusão são muito altas
- As taxas de fluência observadas experimentalmente são muito maiores do que as calculadas
- As fontes e drenos de lacunas são, na verdade, os contornos de grão



● atomo
○ lacuna



● atomo
○ lacuna

Mecanismos difusionais

Mecanismo de Nabarro-Herring

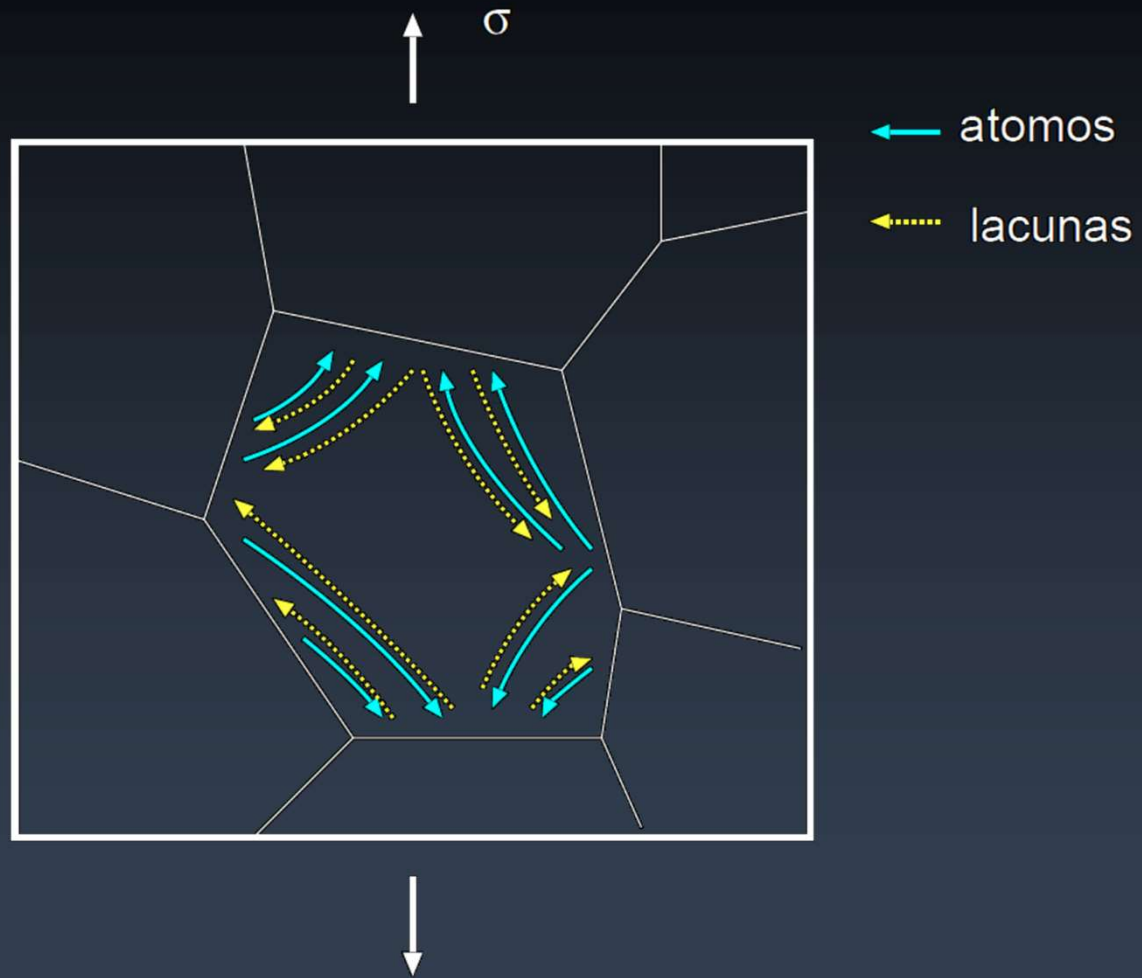
- Observado experimentalmente em tensões baixas ($\sigma/G < 10^{-4}$) e temperaturas homólogas altas ($>0,7$)

$$\dot{\epsilon}_{min} \approx \frac{7\sigma Db^3}{k_B T d^2}$$

$$p=2, n=1$$

Mecanismos difusionais

- Aspecto crítico é o papel dos contornos de grão *paralelos ao esforço* no fornecimento de lacunas
- Para evitar a ação deste mecanismo, devem-se evitar esses contornos de grão
- Grãos colunares ou monocristais
- O ganho de resistência mecânica pelo efeito Hall-Petch é menor do que a queda de resistência à fluência



Mecanismos difusionais

Mecanismo de Coble

- Temperaturas mais baixas do que o mecanismo NH
- Entalpia de ativação menor
- Difusão nos contornos de grão como mecanismo principal
- $n=1, p=3$

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

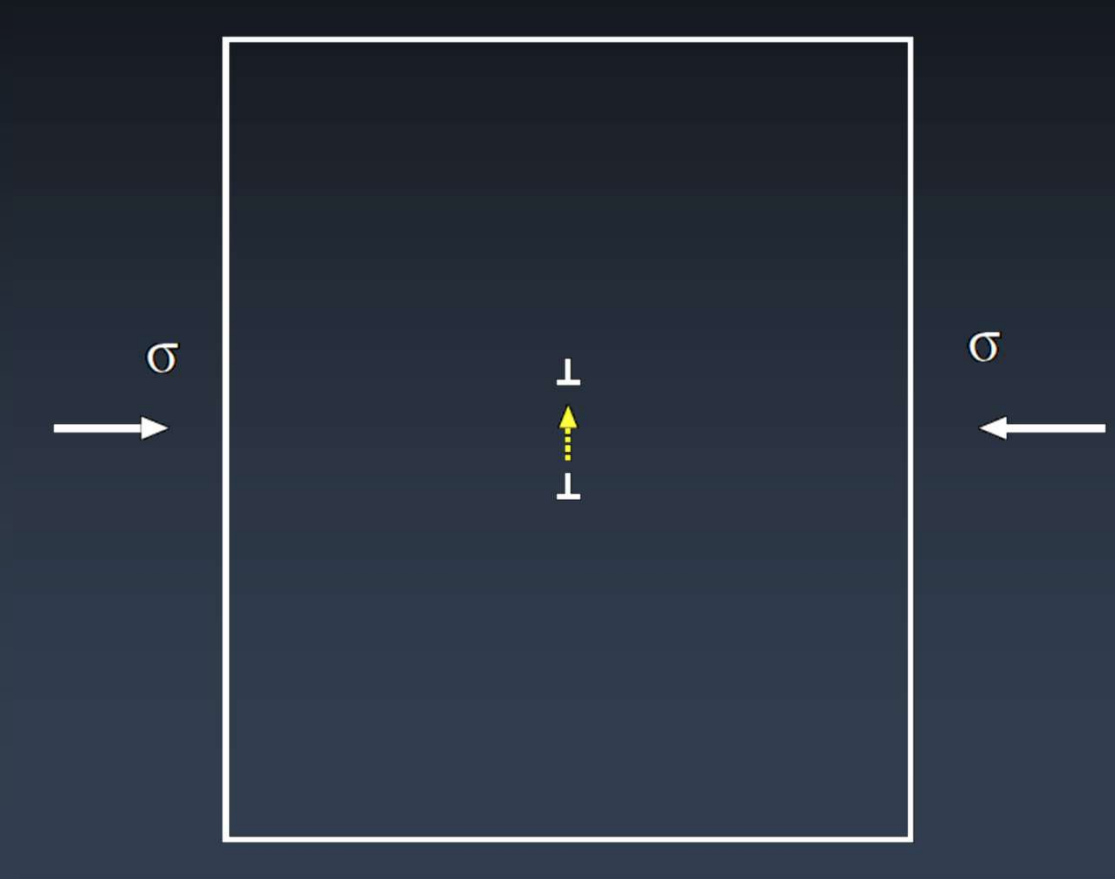
Mecanismos difusionais

Mecanismo de Haper-Dorn

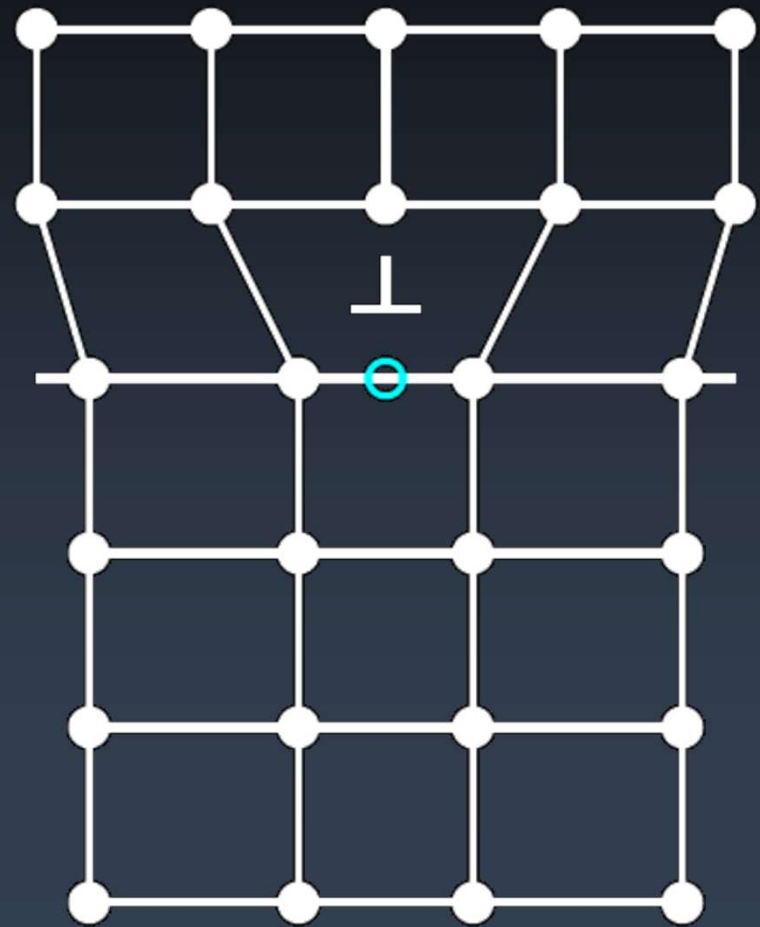
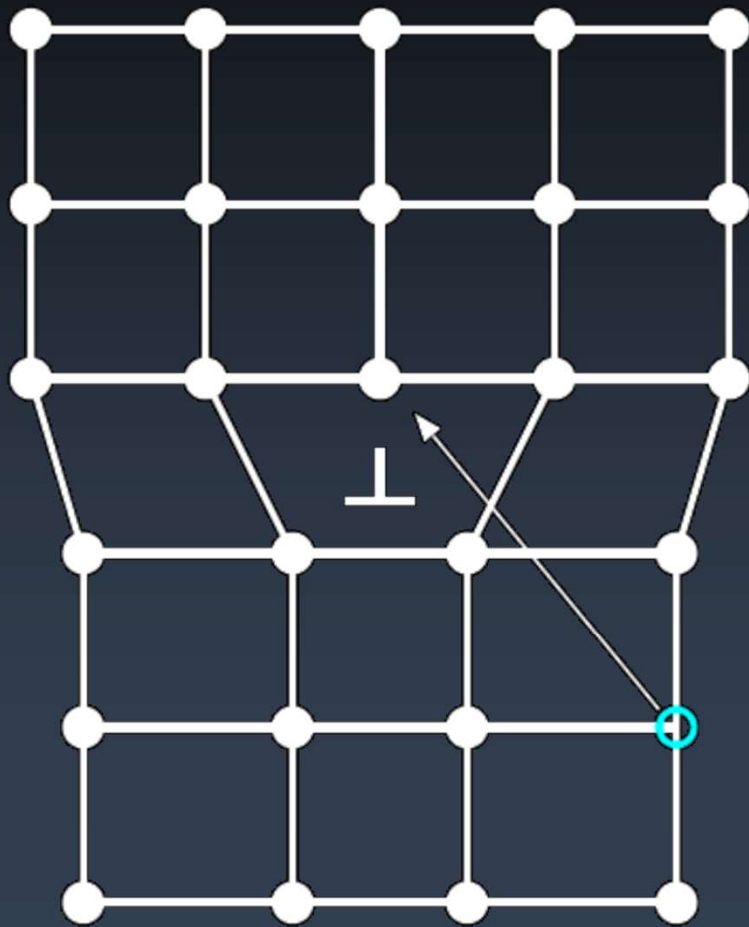
- Ascensão de discordâncias em cunha controlada por difusão de lacunas
- $n=1; p=0$
- Independe de tamanho de grão
- Só é observado em materiais com grão grosseiro ou monocristais

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

Mecanismos difusionais



Mecanismos difusionais



Mecanismos difusionais

- Harper-Dorn:
 - tensões baixas e temperaturas elevadas; predomina em grãos grosseiros ou monocristais
 - Observado em alguns metais, mas pouquíssimo relatado em cerâmicas – Cerâmicas têm TG baixo, favorecendo outros mecanismos
- Cerâmicas: principalmente NH ou Coble
 - A espécie iônica que se difunde mais pode variar com a temperatura ou tensão

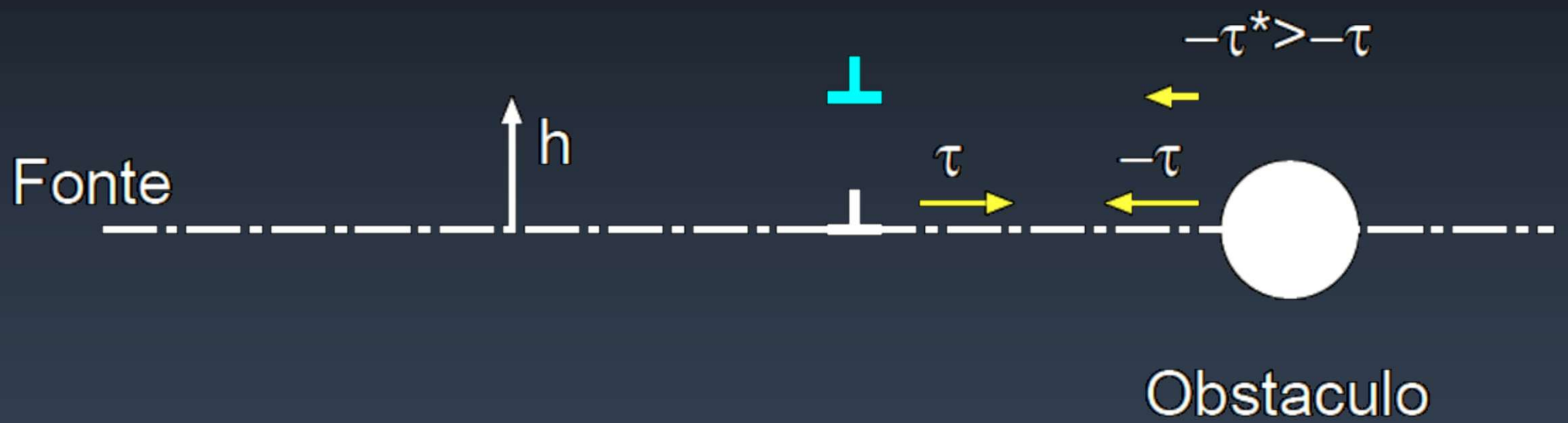
Dislocation Creep

- Em tensões maiores ($10^{-4} \leq (\frac{\sigma}{G}) \leq 10^{-2}$), pode-se ativar a superação de obstáculos por meio de ascensão de discordâncias
- Difere do mecanismo de Harper-Dorn, pois inclui o escorregamento da discordância

- $n=5, p=0$

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

Dislocation Creep



Escorregamento de discordâncias

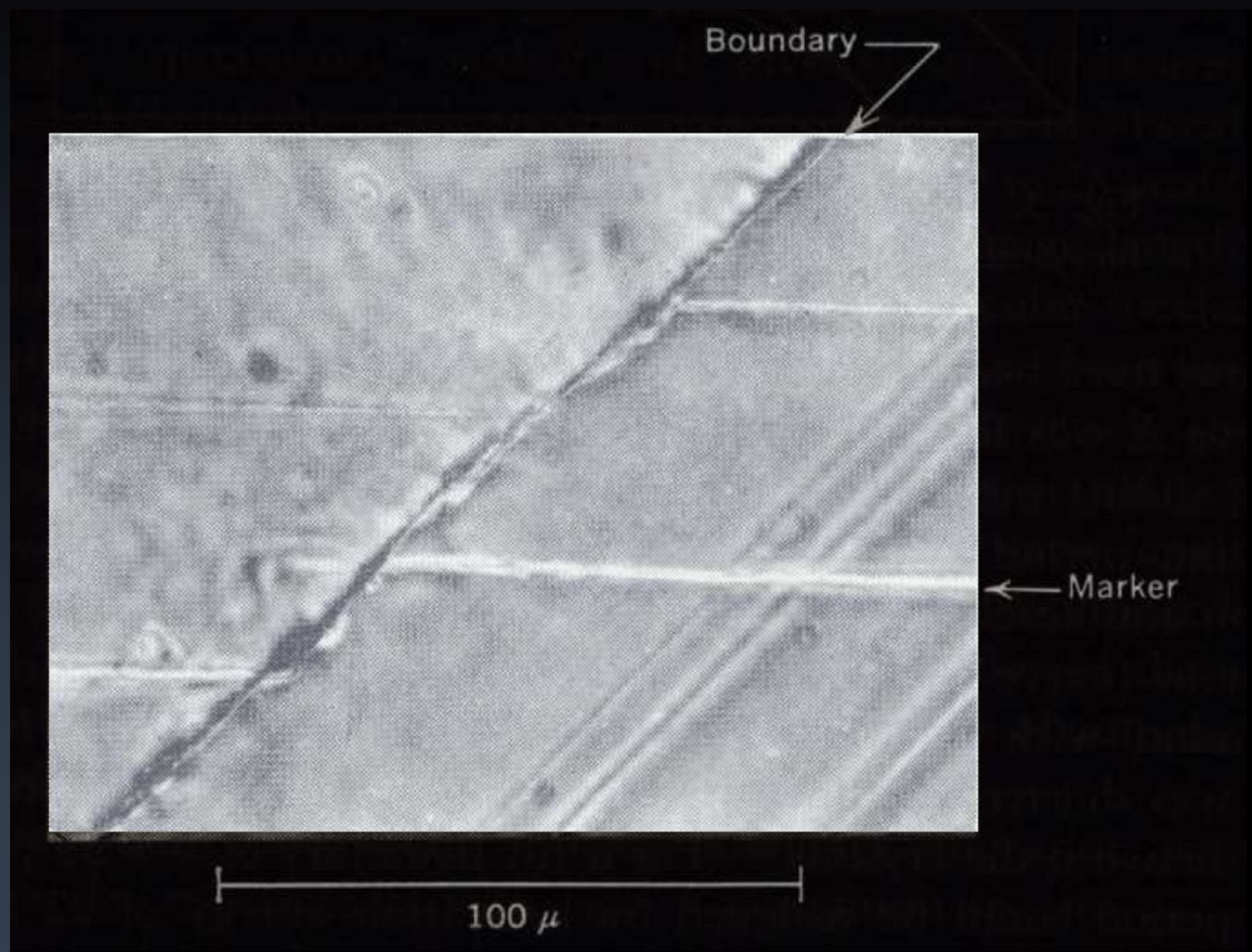
- Níveis de tensões mais altos ($\sigma/G > 0,2$) $\rightarrow n \approx 10$ ou dependência exponencial na tensão – quebra da lei de potência
- Mecanismo: escorregamento termicamente ativado de discordâncias
 - Flutuações térmicas permitem localmente que se supere a CRSS

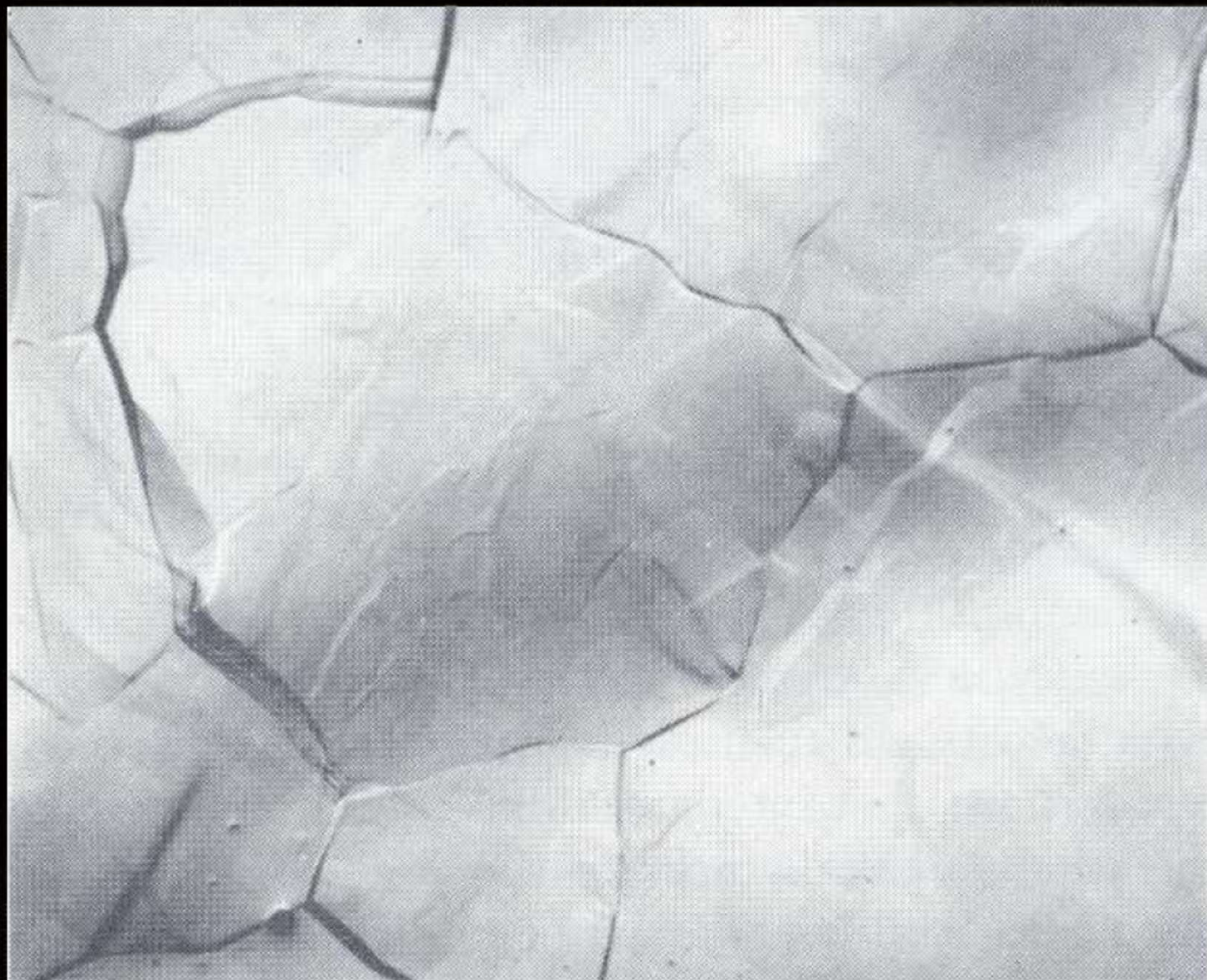
Escorregamento Viscoso

- Ocorre quando algum fenômeno causa o surgimento de uma componente de atrito para a discordância
 - Interações com solutos ou fases ordenadas
- $n=3$

Escorregamento de contornos de grão

- Observado em todos os mecanismos de fluência
- A compatibilidade de contornos só se mantém se esse grau de liberdade estiver disponível para o CG (NH e Coble)
- Importante no estágio terciário
- Associado à formação de microcavidades





100 μ

Escorregamento de contornos de grão

- Quantificação deste efeito é polêmica
- Escorregamento de CGs contribui com uma parcela importante da deformação total
 - em temperaturas próximas à de fusão
 - Tamanhos de grão submicrométricos

Escorregamento de contornos de grão

- Langdon, 2006
 - Rachinger – deformação relativa sem mudança apreciável de forma
 - Lifschitz – Conseqüência de mecanismos difusionais
- Escorregamento de contornos é mais pronunciado quando mecanismos difusionais podem ser desprezados



Escorregamento de contornos de grão

- Deformação total:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_g + \varepsilon_{\text{gbs}} + \varepsilon_{\text{dc}}$$

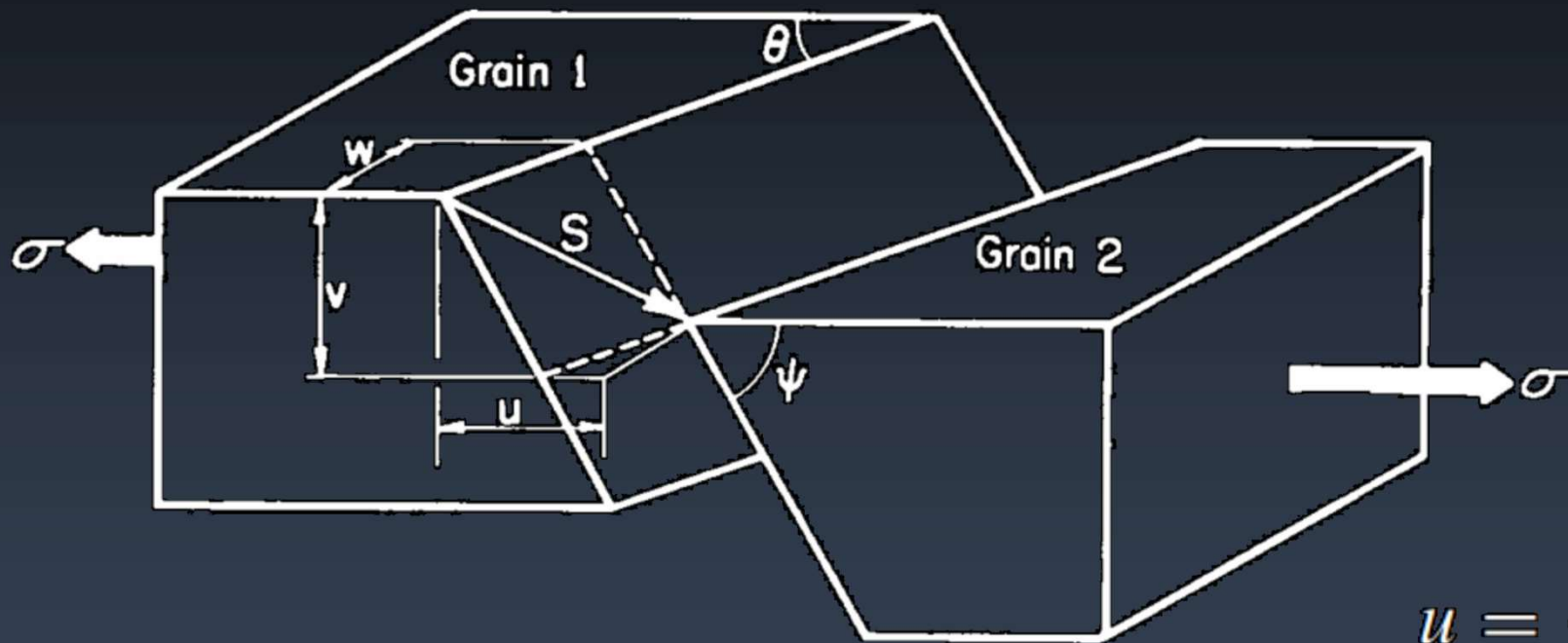
- Se mecanismos difusionais são desprezíveis:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_g + \varepsilon_{\text{gbs}}$$

- Contribuição do escorregamento de contornos:

$$\xi = \frac{\varepsilon_{\text{gbs}}}{\varepsilon_t}$$

Escorregamento de contornos



$$u = \frac{v}{\tan \psi} + \frac{w}{\tan \theta}$$

Escorregamento de contornos de grão

- A equação dada não é viável, pois requer medidas em todos os contornos
- Alternativa: deslocamento de um marcador longitudinal:

$$\varepsilon_{\text{gbs}} = n_{\ell} \bar{u}_{\ell}$$

- Ainda é difícil medir o u , mas o w é mais fácil:

$$\varepsilon_{\text{gbs}} = k' n_{\ell} \bar{w}_{\ell}$$

$$K' = 1,5$$

Lembrando:

- Deformação total:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_g + \varepsilon_{\text{gbs}} + \varepsilon_{\text{dc}}$$

- Se mecanismos difusionais são desprezíveis:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_g + \varepsilon_{\text{gbs}}$$

- Contribuição do escorregamento de contornos:

$$\xi = \frac{\varepsilon_{\text{gbs}}}{\varepsilon_t}$$

Escorregamento de contornos de grão

- Na ausência de mecanismos difusionais:

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

- Se tanto ε_g quanto ε_{GBS} seguirem a equação MBD:

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

Escorregamento de contornos de grão

- Equação permite achar p_{GBS} e n_{GBS} a partir de dados experimentais

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

- Para alumínio: $p_{GBS} = 1$ e $n_{GBS} = 3$. D_{GBS} é o coeficiente de autodifusão do alumínio.

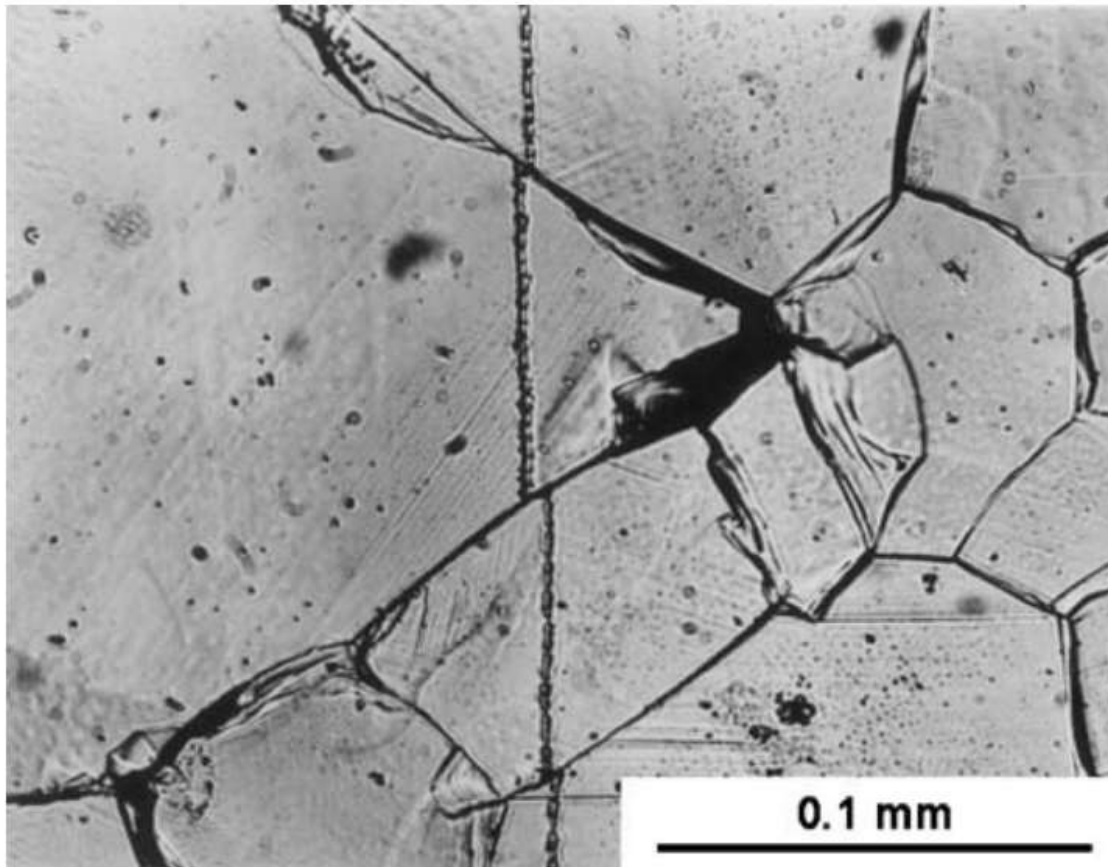


Figure 3 The occurrence of GBS revealed by the boundary offsets in a transverse marker line for a Mg-0.78% Al alloy tested under creep conditions at 473 K: the tensile axis is horizontal [27].

J MATER SCI 41 (2006) 597-609

Grain boundary sliding revisited: Developments in sliding over four decades

TERENCE G. LANGDON
Departments of Aerospace & Mechanical Engineering and Materials Science,
University of Southern California, Los Angeles, CA 90089-1453, USA
E-mail: langdon@usc.edu

Dispersão de precipitados

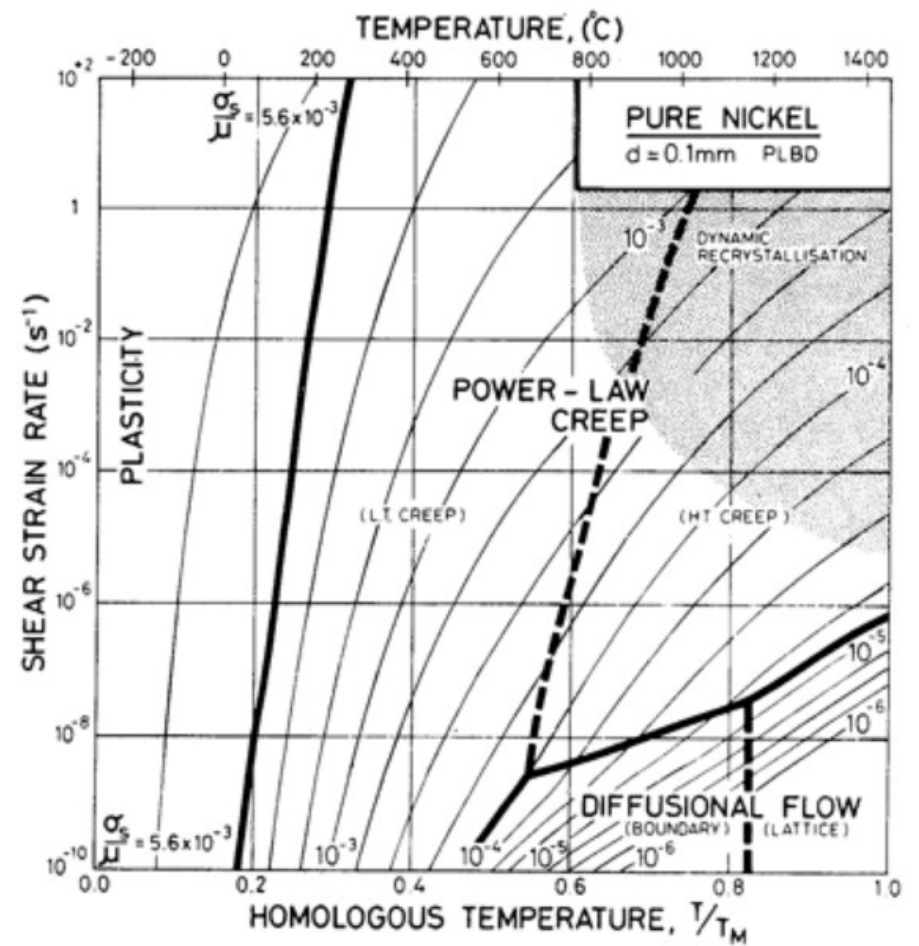
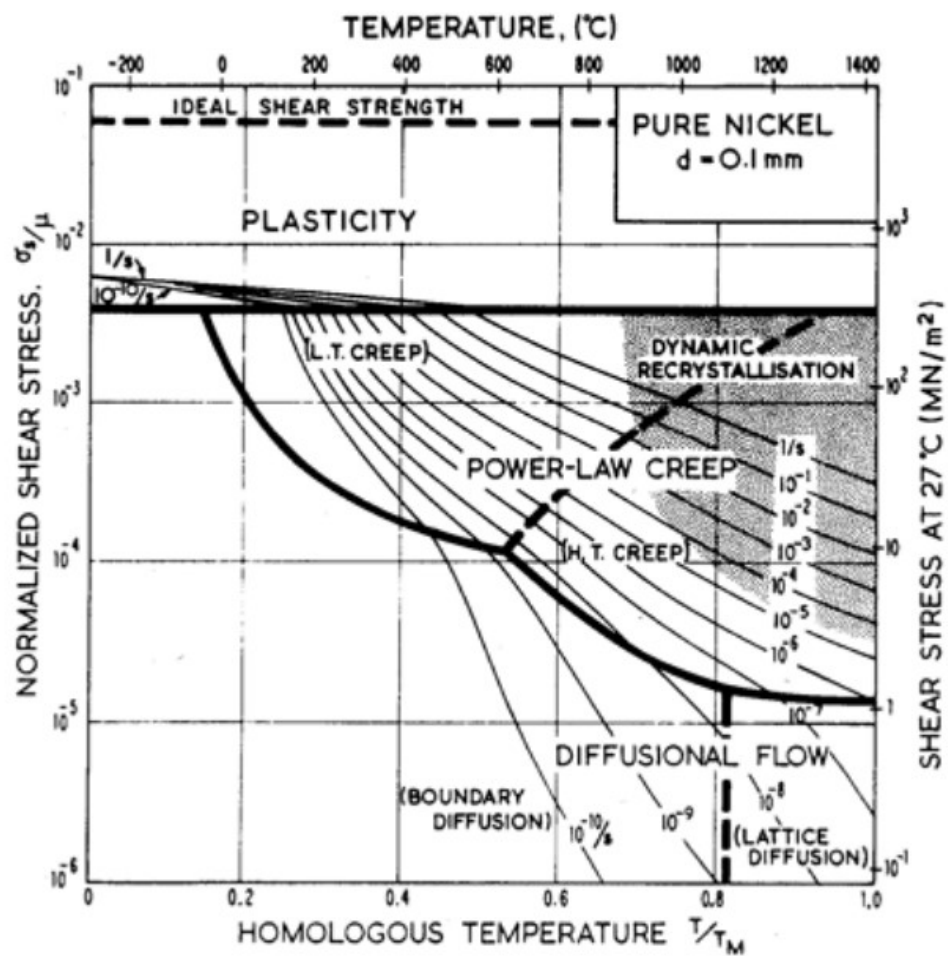
- Ligas com precipitados dispersos têm n muito alto (próximo de 20, podendo chegar a 80 ou 100) e entalpias de ativação muito mais altas do que as da difusão no volume

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

- Introdução de uma tensão limite que deve ser superada para ocorrência de deformação em fluência
 - Desacoplamento de discordâncias das interfaces matriz-partícula

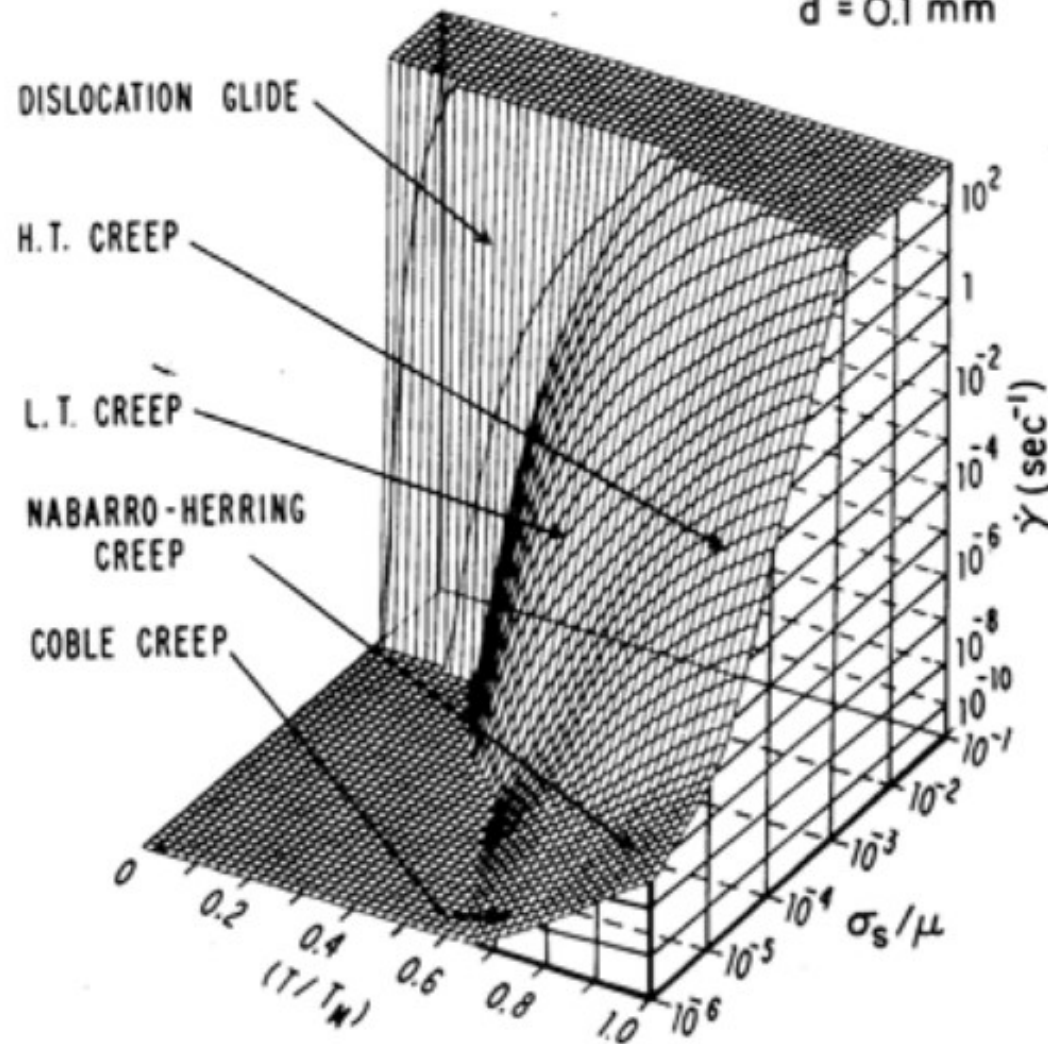
Mapas de Weertman-Ashby

- Indicam as regiões correspondentes a cada mecanismo principal de fluência para conjuntos de condições
- Cortes isotérmicos, e as isoterms são lançadas no gráfico como curvas de nível



PURE NICKEL

$d = 0.1 \text{ mm}$

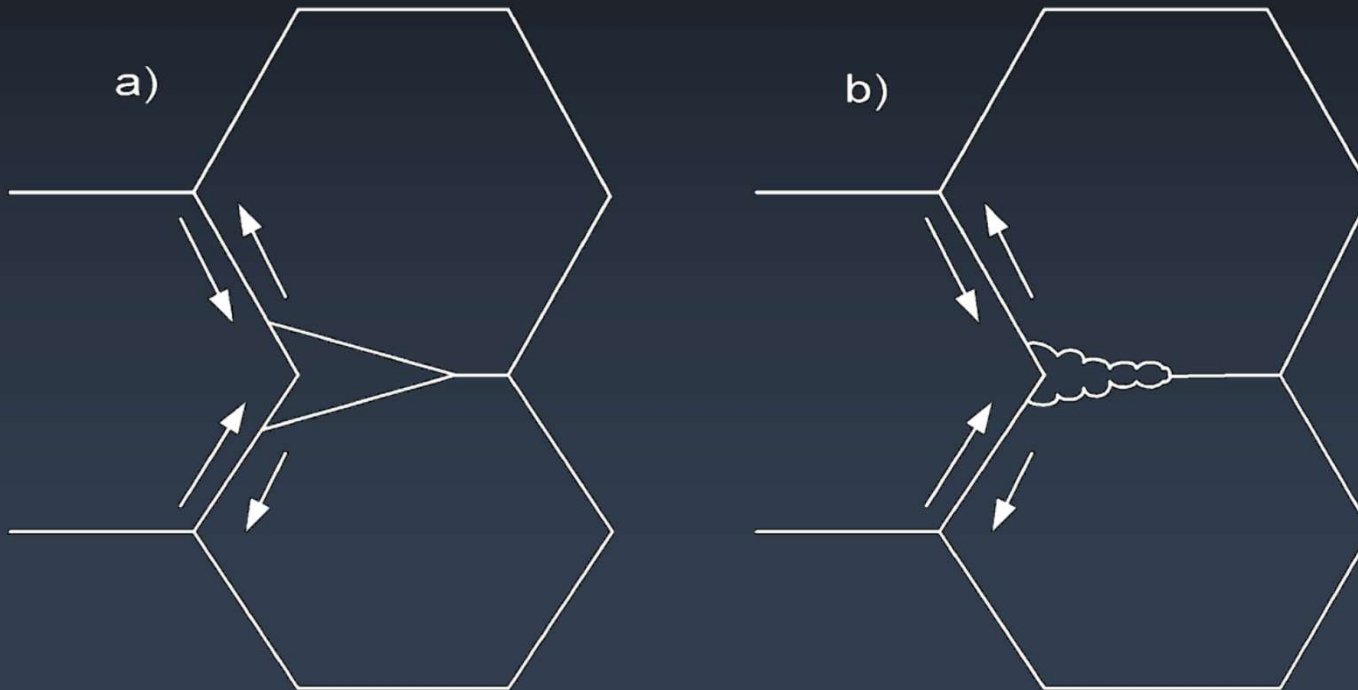


Fratura por fluência

- Aumento da temperatura: fratura muda de transgranular para intergranular
- Temperatura de transição: temperatura **equicoesiva**.
- Fratura em fluência: formação de microcavidades durante o estágio III – deslizamento de contornos de grão
- Mecanismo chamado de CAVITAÇÃO
- Sensível à pressão isostática externa

Mecanismos de cavitação

Tipo w (wedge) – surge em pontos triplos sujeitos a cisalhamento



PERGAMON

International Journal of Plasticity 19 (2003) 1715–1748

www.elsevier.com/locate/ijplas

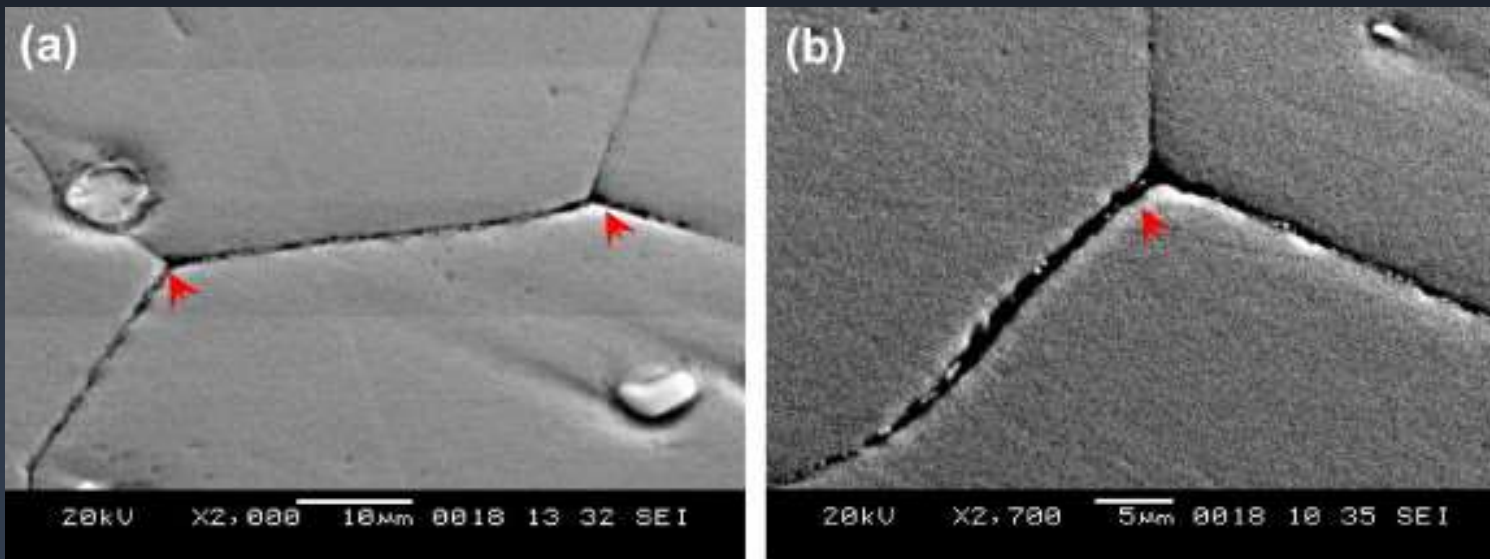
INTERNATIONAL JOURNAL OF
Plasticity

Creep cavitation in metals

M.E. Kassner^{a,*}, T.A. Hayes^b

Mecanismos de cavitação

Tipo w (wedge) – surge em pontos triplos sujeitos a cisalhamento



Engineering Failure Analysis
Volume 18, Issue 6, September 2011, Pages 1407-1414



Creep failure of low pressure turbine blade of an aircraft engine

N. Ejaz , I.N. Qureshi, S.A. Rizvi

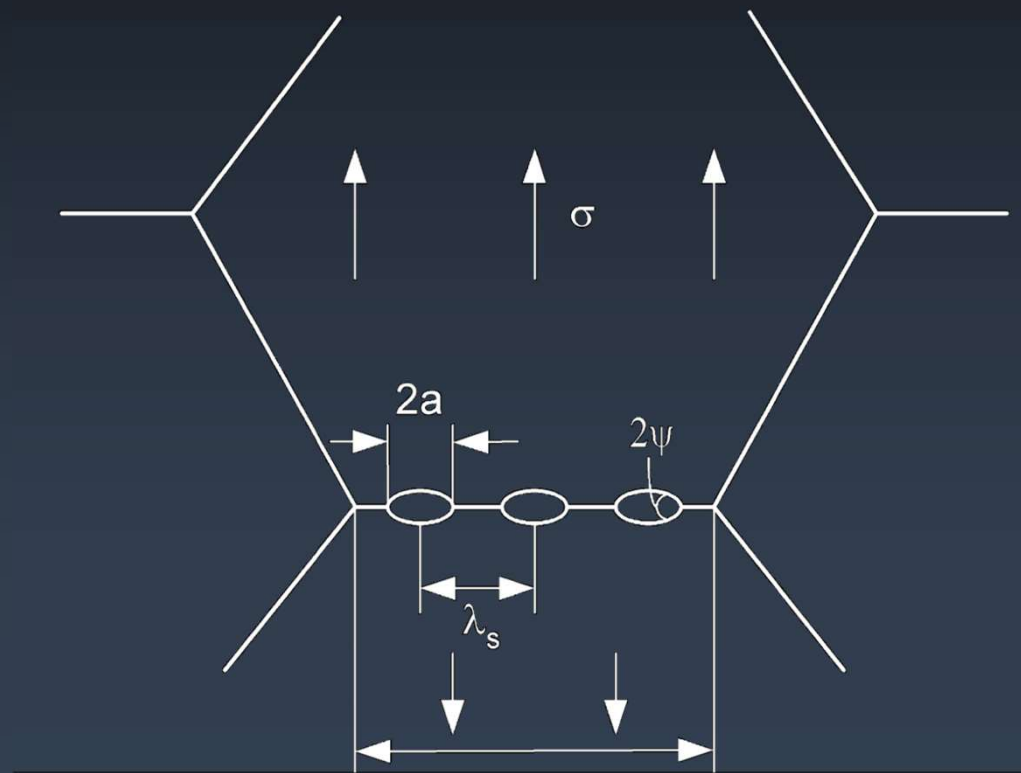
[Show more](#)

<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2011.03.010>

[Get rights and content](#)

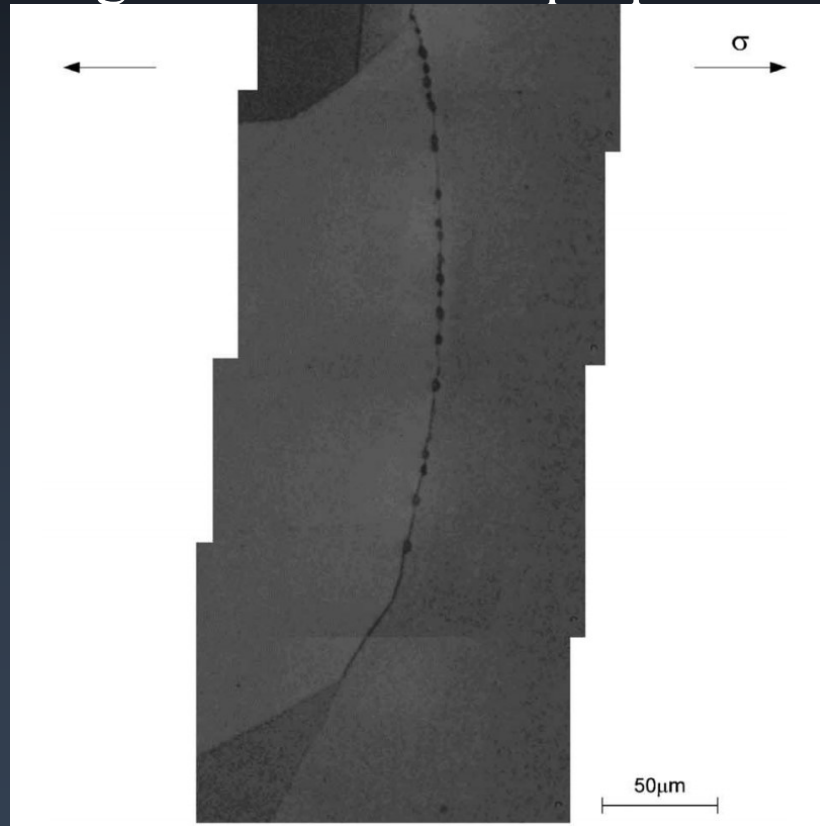
Mecanismos de cavitação

- Tipo r (round) – Surge em contornos perpendiculares à sollicitação



Mecanismos de cavitação

- Tipo r (round) – Surge em contornos perpendiculares à sollicitação



Mecanismos de cavitação

- Tipo *w* predomina em altas tensões e baixas temperaturas
 - Está associado à incapacidade de acomodação de deformações por deslizamento de contornos
- Tipo *r* surge da condensação de lacunas nos contornos perpendiculares à solicitação – predomina em temperaturas mais altas