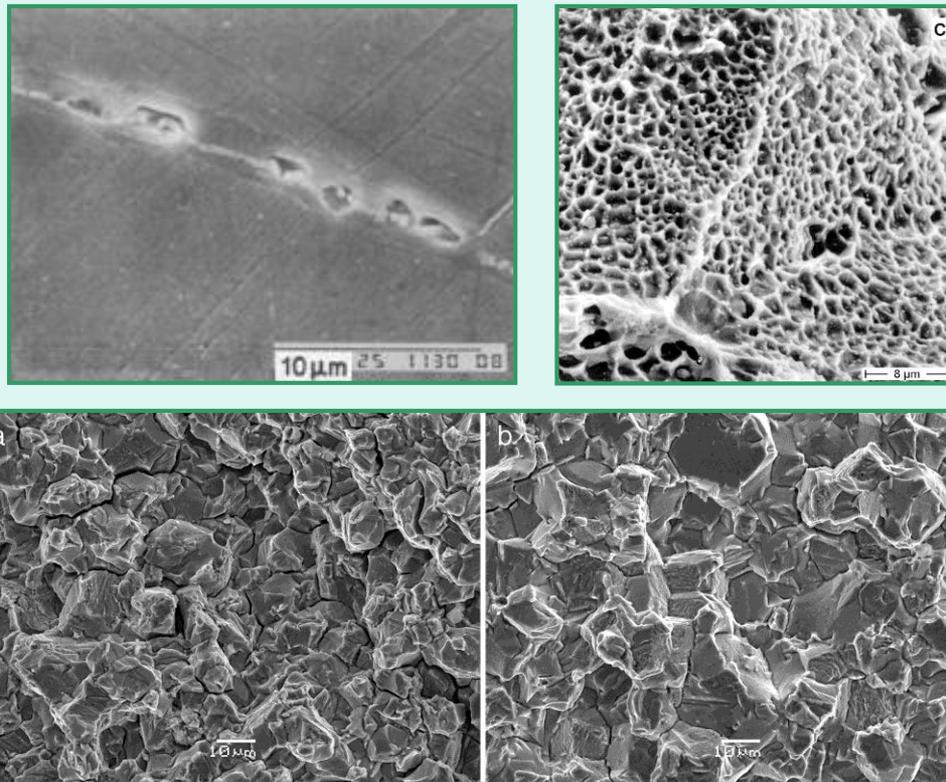


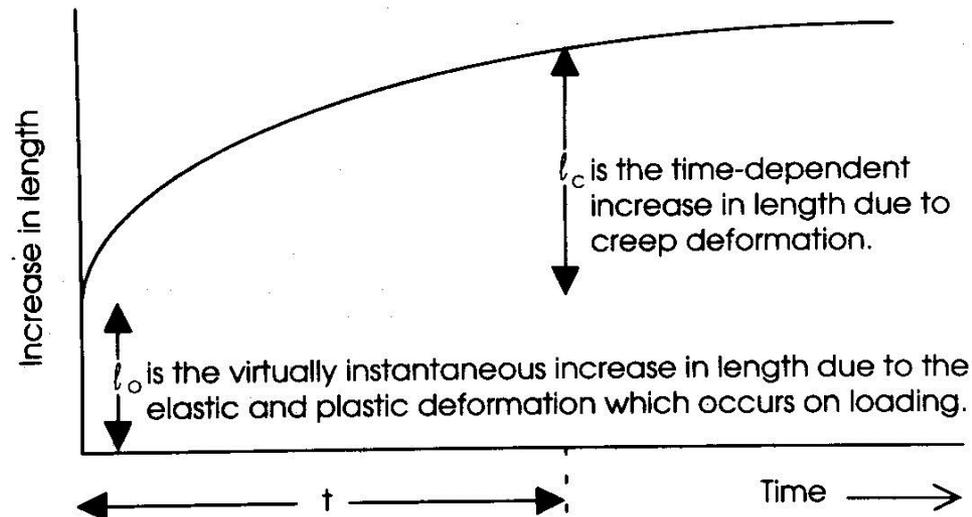
## 9 – ENSAIO DE FLUÊNCIA



# O FENÔMENO DA FLUÊNCIA

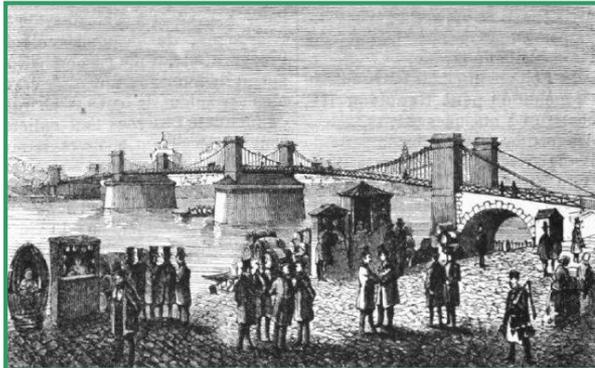
## Comportamento Mecânico Dependente do Tempo

- Deformações elástica e plástica idealizadas como instantâneas
- Um sólido pode sofrer deformações que dependem do tempo, mesmo se a tensão for mantida constante
- **Fluência** é a deformação plástica que ocorre gradualmente no tempo
- Exemplo: variação do comprimento de um fio suportando um peso em sua extremidade por um longo período de tempo

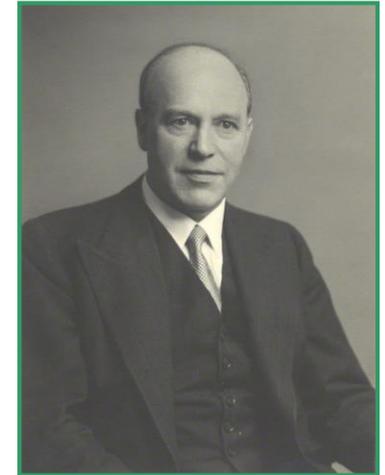
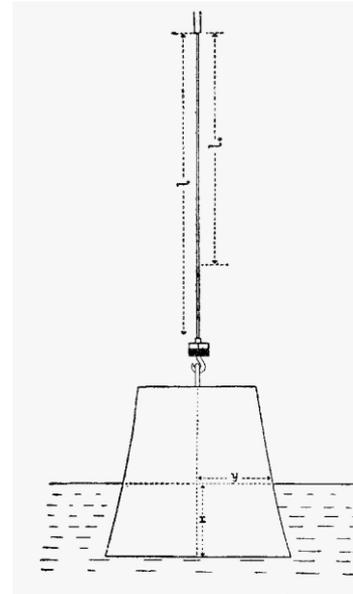


# OS PIONEIROS

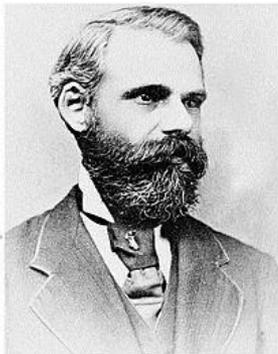
Louis-Joseph Vicat (1786-1861)



Edward da Costa Andrade (1887-1971)

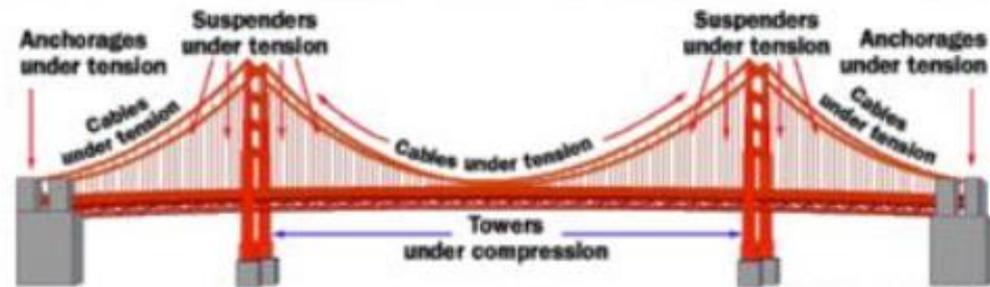


Robert Henry Thurston (1839-1903)



Robert H. Thurston

*Esquema de uma ponte suspensa*

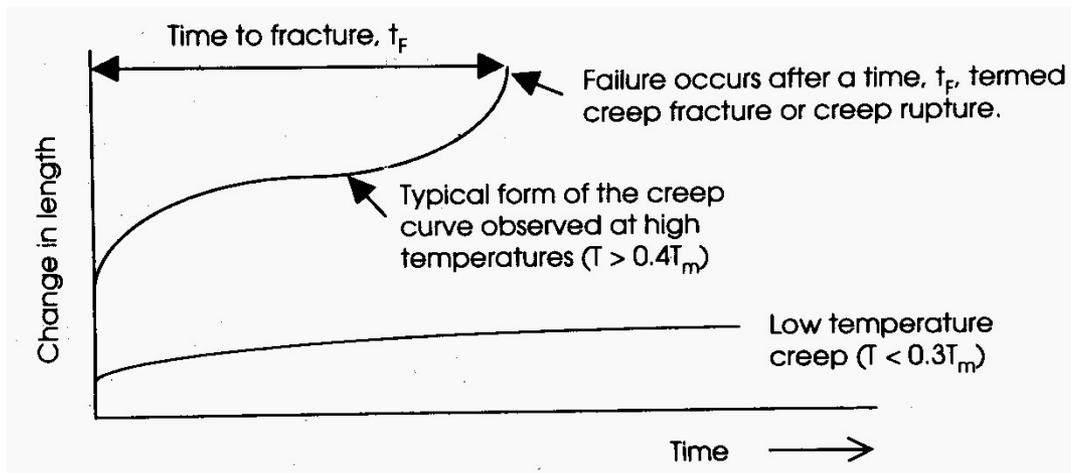


# EFEITO DA TEMPERATURA

## Resistência Mecânica diminui ao se aumentar a Temperatura

### Fatores:

- Aumento da mobilidade dos átomos (difusão) e das discordâncias (escalagem)
- Operação de novos sistemas de deslizamento
- Deformação nos contornos de grão
- Alteração da estabilidade metalúrgica (exemplos: crescimento de grão, superenvelhecimento)
- Interação com o meio ambiente é favorecida

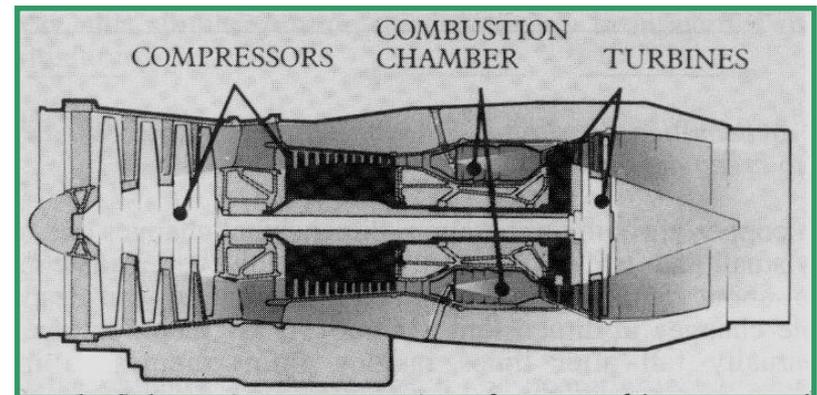
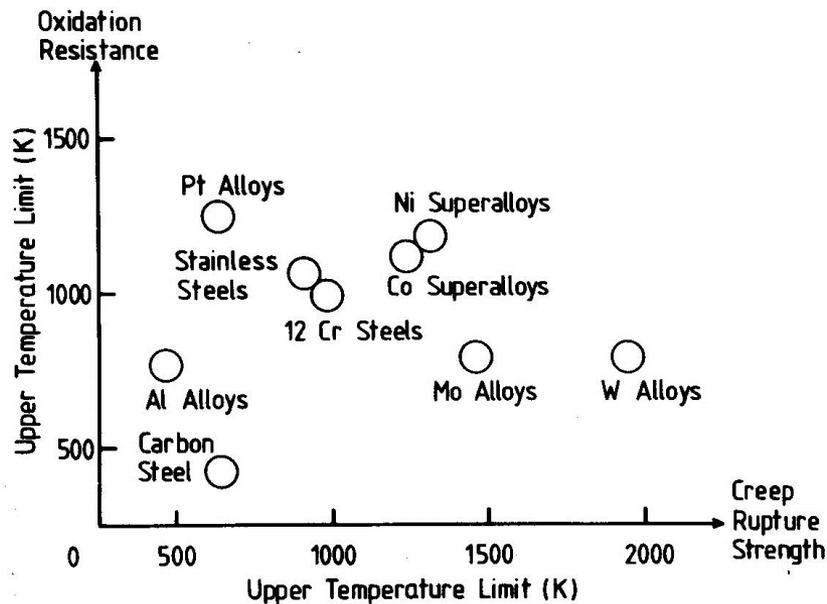


*Para metais e materiais cerâmicos cristalinos, a fluência geralmente torna-se importante, do ponto de vista tecnológico, a temperaturas homólogas superiores a 0,4. Em materiais poliméricos, altas deformações de fluência podem ocorrer acima da temperatura de transição vítrea.*

# EFEITO DA TEMPERATURA

## Aplicações em Engenharia

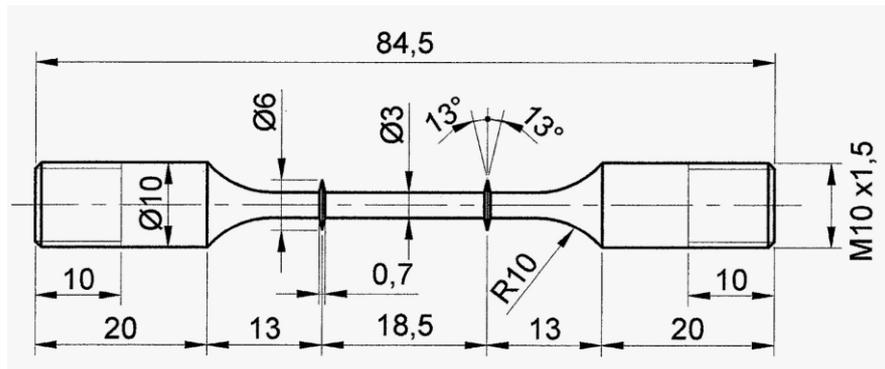
- Motores a jato, turbinas a vapor, aplicações petroquímicas, reatores nucleares
- Materiais devem combinar resistência à fluência e à oxidação
- Exemplos:
  - Tungstênio ao vácuo (2.000 K) e ao ar (800 K)
  - Seleção de materiais para motor a jato (milhares de horas a 1.300 K)



# ENSAIO DE FLUÊNCIA

## Considerações básicas

- Procedimentos de ensaio padronizados por norma, como a ASTM E139
- Usualmente empregam-se corpos-de-prova cilíndricos submetidos a solicitação uniaxial
- Classificação dos ensaios:
  - Ensaio de ruptura por fluência
  - Ensaio de fluência à carga constante
  - Ensaio de fluência à tensão constante
  - Ensaio de relaxação



# ENSAIO DE FLUÊNCIA

## Ruptura por Fluência

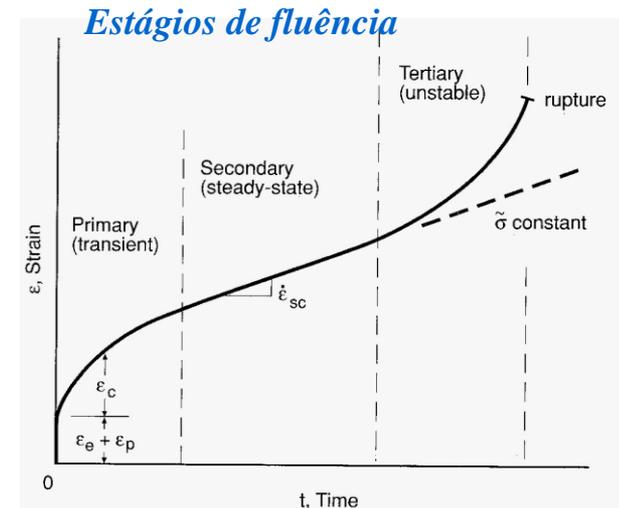
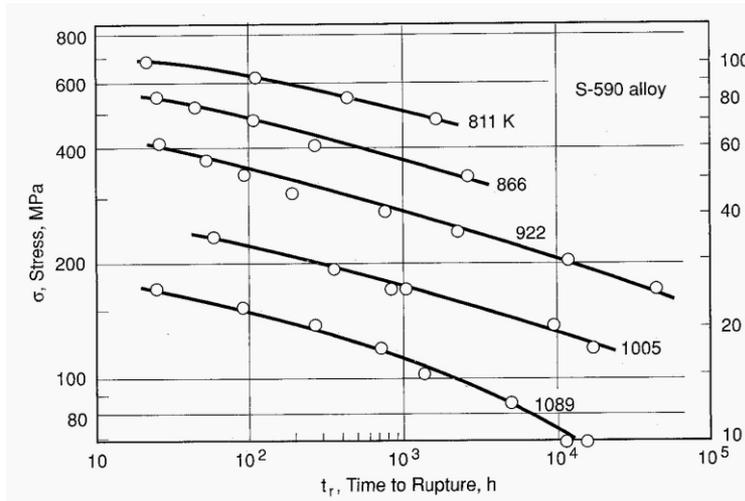
- Avalia o efeito da temperatura na capacidade de suportar cargas por tempos longos. Mede-se o tempo necessário para a ruptura dos corpos-de-prova.

## Ensaio de Fluência sob Carga Constante e Tensão Constante

- Quanto é necessário conhecer a curva de fluência. Mede-se a variação de comprimento do corpo-de-prova durante o ensaio.

## Ensaio de Relaxação

- A deformação é mantida constante e mede-se a variação da força necessária.

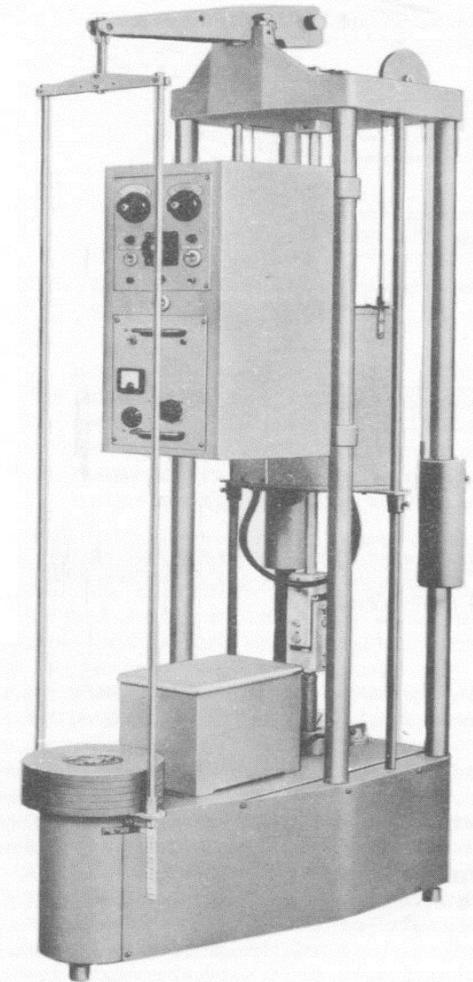
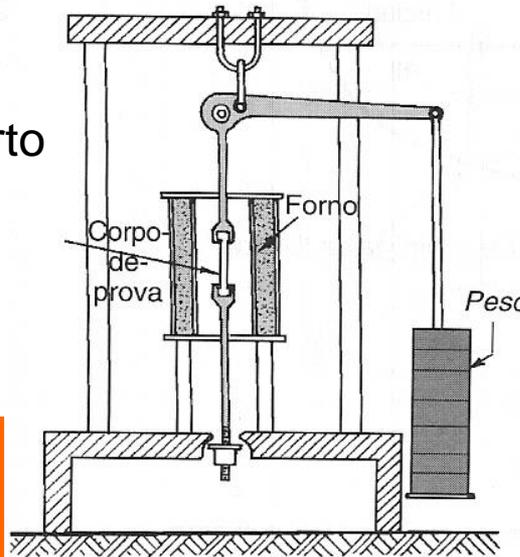


# EQUIPAMENTO CONVENCIONAL PARA ENSAIO DE FLUÊNCIA

## Máquinas Convencionais

- Aplicação de carga constante
- Sistema de alavanca e peso morto

Grupo de máquinas INSTRON M3,  
capacidade 30 kN / 1.200 °C



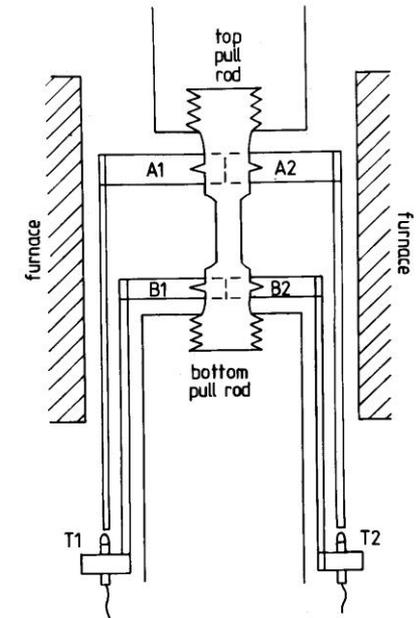
# EQUIPAMENTO CONVENCIONAL PARA ENSAIO DE FLUÊNCIA

## Máquinas Convencionais

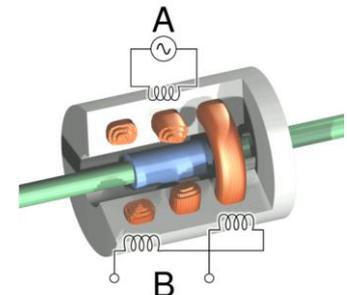
- Termopar em contato com c.d.p.
- LVDT para medir o alongamento



*A montagem é feita fora da máquina*



*Esquema de um LVDT*



# ANÁLISE E REPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

## Resultados de um ensaio de fluência

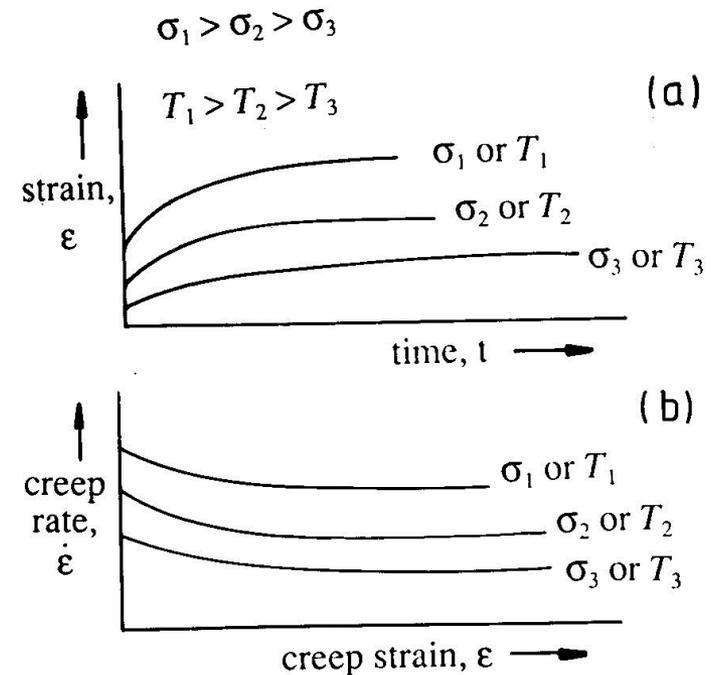
São fornecidos os valores de:

- Tensão,  $\sigma$
- Temperatura,  $T$
- Taxa de fluência estacionária,  $\dot{\epsilon}_s$
- Tempo de ruptura,  $t_R$



*ASTM E139: "Reported stress is equal to value of constant axial force applied to the specimen divided by the cross-sectional area measured before the test, at room temperature".*

Ensaio a Baixas Temperaturas  
(  $T < 0,3 T_m$  )

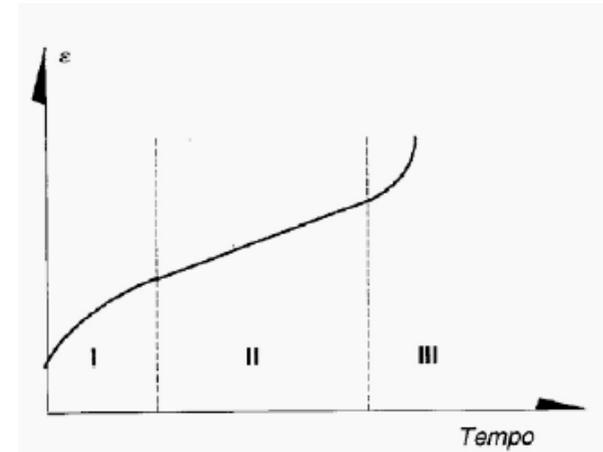
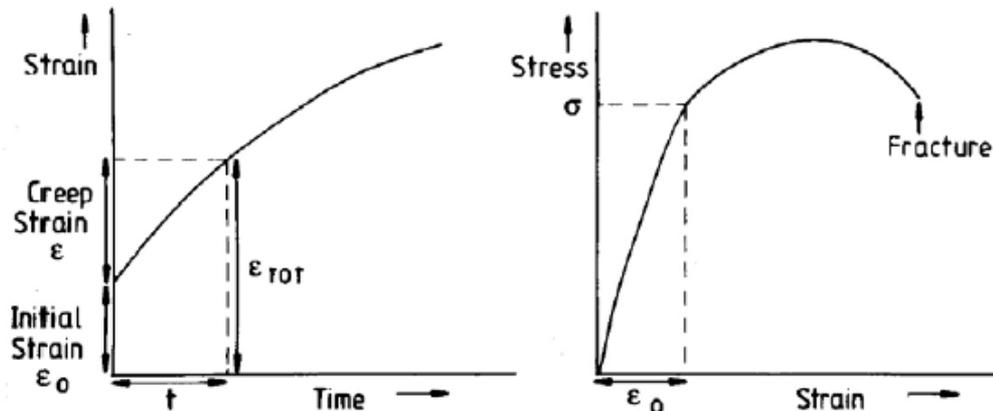


# ANÁLISE E REPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

- Num dado instante:  $\varepsilon_{tot} = \varepsilon_0 + \varepsilon$

- ✓  $\varepsilon_0 = f_1(\sigma, T)$  (ensaio de tração a quente)

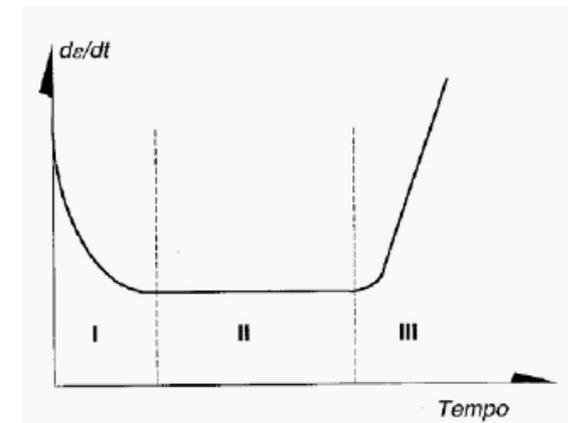
- ✓  $\varepsilon = f_2(\sigma, T, t)$



- Regime de alta temperatura: descrevem-se as diferentes regiões da curva de fluência:

- ✓  $\dot{\varepsilon} = f_3(\sigma, T, t)$

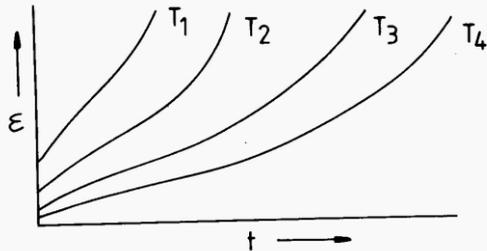
- ✓  $\dot{\varepsilon} = f_4(\sigma, T, \varepsilon)$



# ANÁLISE E REPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

- Estado de Equilíbrio ( $T > 0,5 T_m$ ) :

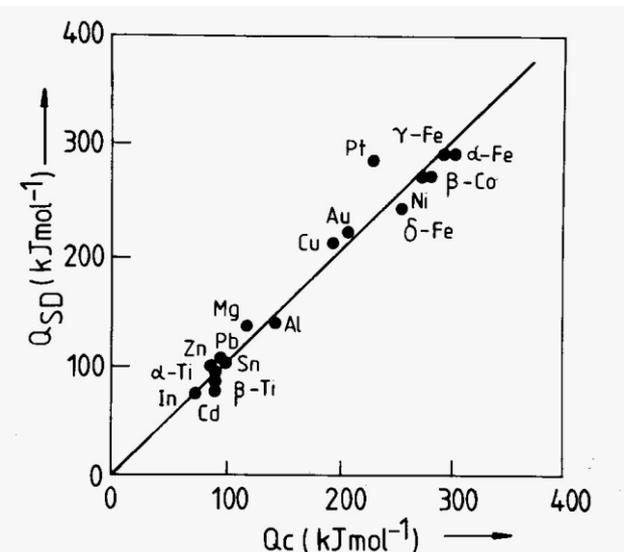
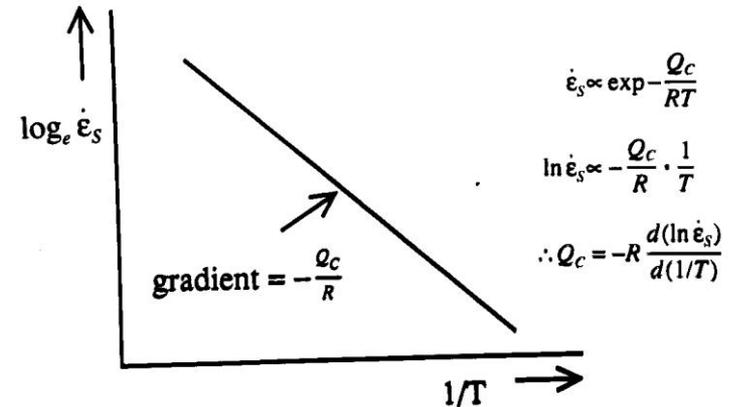
- ✓  $\dot{\epsilon}_s = f_5(\sigma, T) = u(\sigma)v(T)$
- ✓ Funções  $u$  e  $v$  consideradas independentes
- ✓ Para obter  $v$  : Mesmo  $\sigma$  e diferentes  $T$
- ✓ Faça o gráfico  $\ln(\dot{\epsilon})$  versus  $\frac{1}{T}$
- ✓  $\dot{\epsilon}_s \propto \exp\left(-\frac{Q_c}{RT}\right)$  (dependência de  $T$ : Arrhenius)



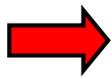
- Relação entre as energias de ativação para fluência  $Q_c$  e auto-difusão  $Q_{SD}$

- ✓  $Q_{SD}$  é a soma das energias para formação e movimentação de lacunas
- ✓ Relação nem sempre observada, indicando diferentes mecanismos controladores de  $\dot{\epsilon}_s$

Ensaios à mesma tensão sob diferentes temperaturas

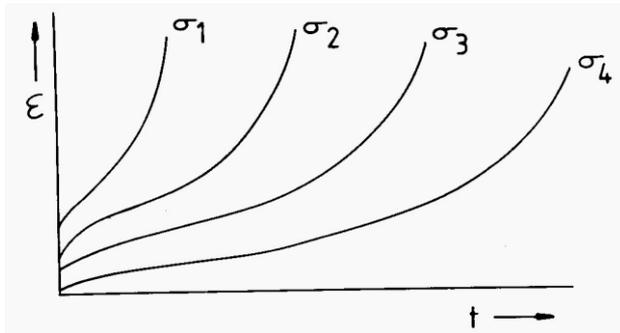


# ANÁLISE E REPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS



- Dependência de  $\dot{\epsilon}_s$  com  $\sigma$  (função  $n$ ): Ensaios com mesmo  $T$
- Não se observa uma relação única; correlação satisfatória é dada por uma relação potencial:

✓  $\dot{\epsilon}_s \propto \sigma^n$  (dependência de  $\sigma$ : Lei de Norton)

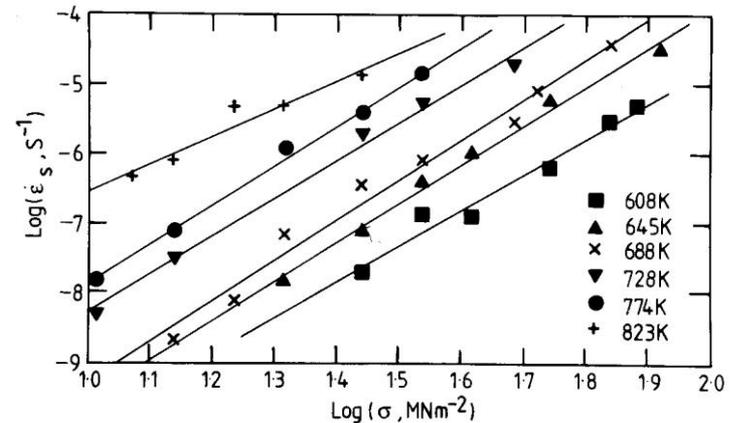
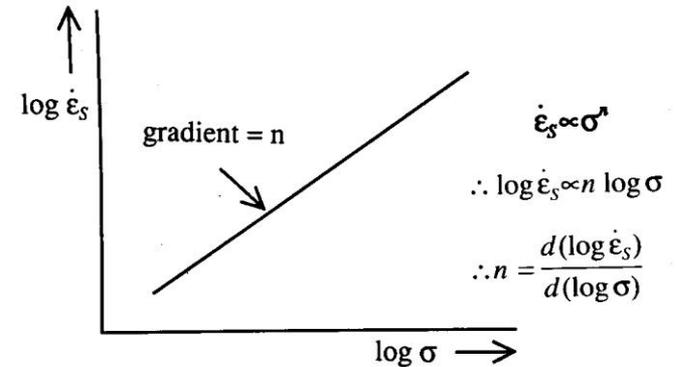


- Representação do comportamento em altas temperaturas:

✓  $\dot{\epsilon}_s = A\sigma^n \exp\left(-\frac{Q_c}{RT}\right)$

- ✓ Exemplo do cobre policristalino: na faixa de temperaturas entre 608-823K obtém-se  $n \approx 5$  e  $Q_c \approx 130 \text{ kJmol}^{-1}$  ( $\neq Q_{SD} = 204 \text{ kJmol}^{-1}$ )

Ensaios à mesma temperatura sob diferentes tensões

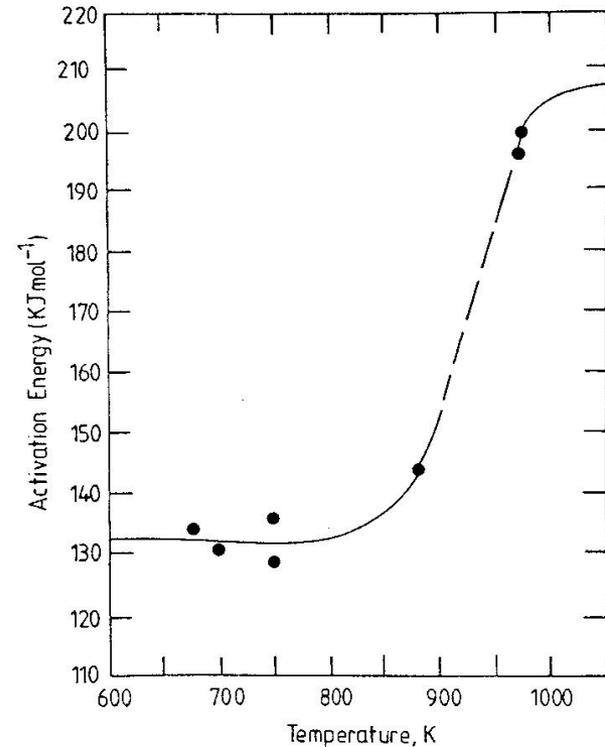
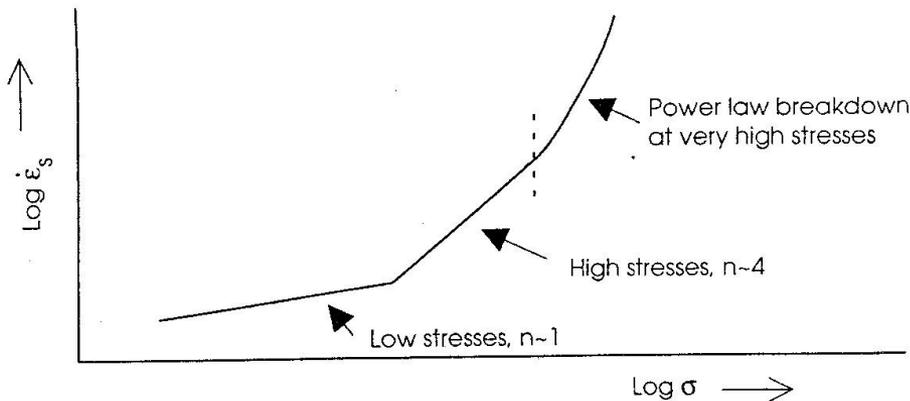


# ANÁLISE E REPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

- Representação do comportamento em altas temperaturas:

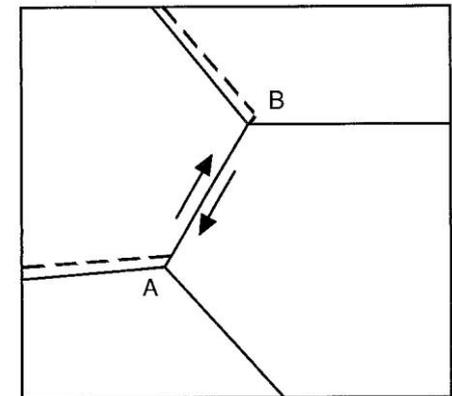
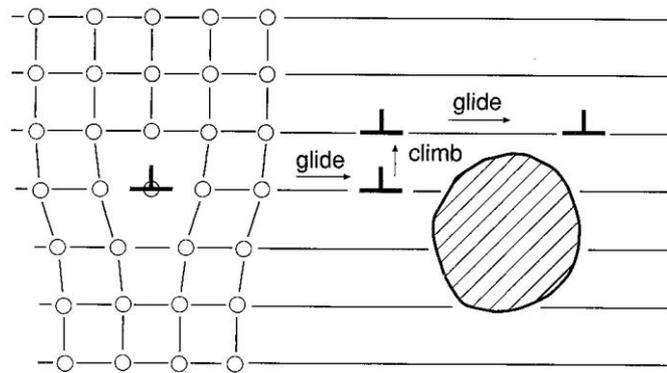
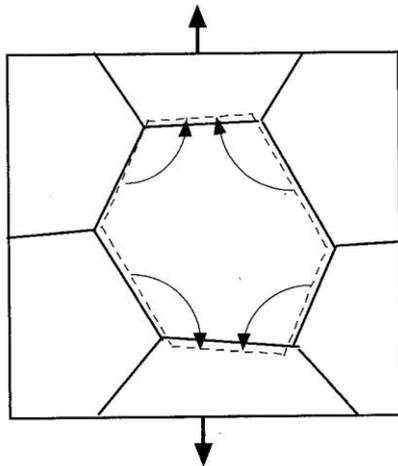
$$\checkmark \quad \dot{\epsilon}_s = A\sigma^n \exp\left(-\frac{Q_c}{RT}\right)$$

- ✓ Além de  $Q_c$  variar com a temperatura, valores de  $n$  variam com a tensão, também sugerindo diferentes mecanismos



# MECANISMOS DE DEFORMAÇÃO EM FLUÊNCIA

- Transporte de átomos por difusão
  - ✓ Ao longo dos contornos de grão (Coble)
  - ✓ Através da lática (Nabarro-Herring)
- Escalagem e deslizamento de discordâncias
- Deslizamento de contornos de grão
- Múltiplos mecanismos: podem atuar de modo independente ou cooperativo



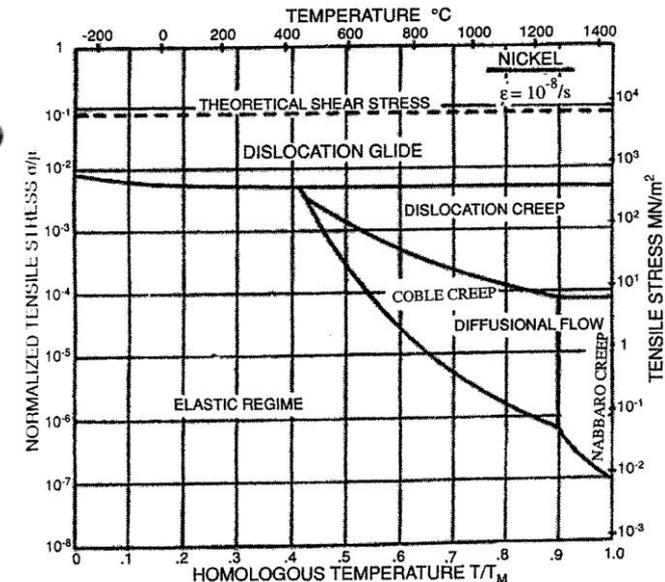
# MECANISMOS DE DEFORMAÇÃO EM FLUÊNCIA

## Mapas de Mecanismos de Deformação:

- **Altas tensões:** predomina deslizamento de discordâncias; **Baixas tensões:** difusão
- Nabarro-Herring é mais importante em altas temperaturas; Coble torna-se importante para menores tamanhos de grão
- Equação geral para materiais cristalinos:

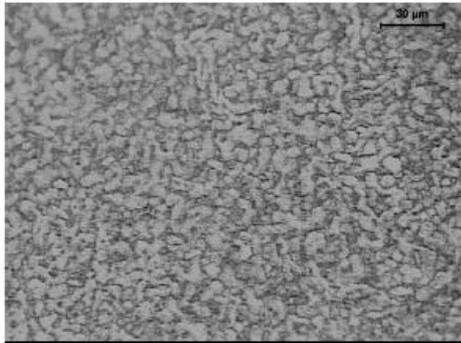
$$\checkmark \quad \dot{\epsilon}_s = \frac{A_2 \sigma^m}{d^q T} \exp\left(-\frac{Q_c}{RT}\right) \quad (d = \text{tamanho médio de grão})$$

Name of Mechanism	$m$	$q$	Description
Diffusional flow (Nabarro-Herring Creep)	1	2	Vacancy diffusion through the crystal lattice
Diffusional flow (Coble creep)	1	3	Vacancy diffusion along grain boundaries
Grain boundary sliding	2	2 or 3	Sliding accommodated by vacancy diffusion through the crystal lattice ( $q = 2$ ) or along grain boundaries ( $q = 3$ )
Dislocation creep (Power law creep)	3 to 8	0	Dislocation motion, with climb over microstructural obstacles

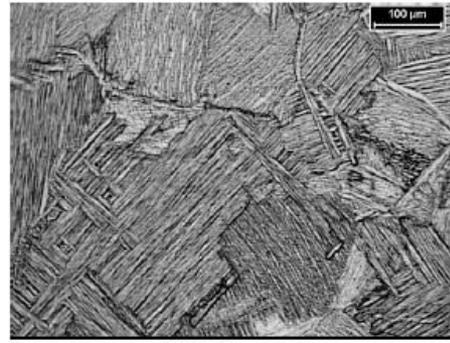


# EFEITO DA MICROESTRUTURA (EXEMPLO)

- Exemplo de aplicação para a liga Ti6Al4V, em duas condições microestruturais



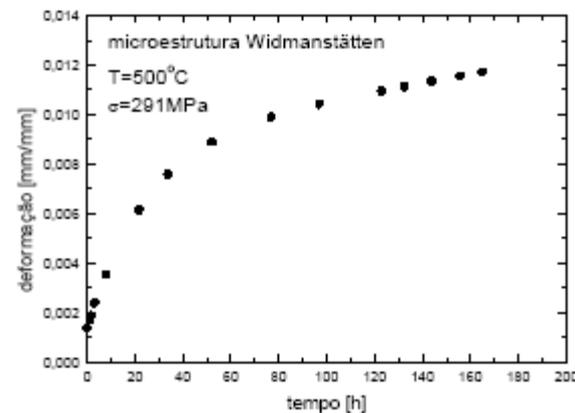
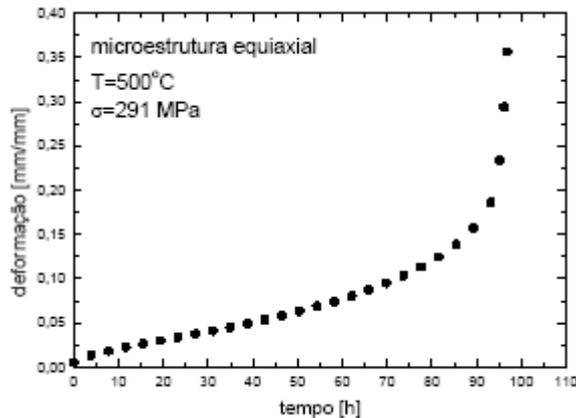
*Equiaxial*



*Widmanstätten*

*Resultados de ensaios a 500 e 600 °C:*

$T$	$\sigma$ (MPa)	Recozida		Widmanstätten	
		$\dot{\epsilon}_S$ ( $h^{-1}$ )	$t_R$ (h)	$\dot{\epsilon}_S$ ( $h^{-1}$ )	$t_R$ (h)
500	291	0,000948	96,790	$1,89 \times 10^{-5}$	-
	403	0,01583	7,798	0,00148	24,650
	472	0,08757	1,392	0,00351	11,850
600	97	0,00353	40,130	$9,05 \times 10^{-5}$	-
	208	0,07073	1,900	0,00362	18,578
	291	0,2808	0,370	0,03103	1,442



# PARÂMETRO TEMPO-TEMPERATURA E ESTIMATIVA DE VIDA

## Extrapolação para Vidas Longas:

- Deformação por fluência pode levar à falha:
  - ✓ Cavitação → Trincas
  - ✓ Recristalização dinâmica → Estricção
- Projetos de Engenharia: longas vidas em serviço (~ 20 anos); Limitação dos Ensaios: 1.000 h (42 dias), às vezes 10.000 h
- Um parâmetro de extrapolção foi proposto por Larson e Miller com base em  $\log \theta_R$

*ASTM E139: "No generally accepted methods are available for extrapolating creep data to temperatures and times beyond the tested range. (...) The method proposed by Larson and Miller takes advantage of the correlation between stress and rupture time (...). In most alloys the data give a quite good correlation by this method. (...). Caution should be used, however, in extrapolating too far time due to parameter correlation tending to vary with time".*

- Métodos usados baseiam-se em ensaios curtos a temperaturas mais altas que a temperatura de serviço, para prever os longos tempos de ruptura à temperatura de serviço:
  - ✓ Escreva a equação de Arrhenius na forma diferencial:  $d\varepsilon = A(\sigma)\exp\left(-\frac{Q_c}{RT}\right)dt$
  - ✓ Integre e defina o parâmetro temperatura-tempo compensado:  $\theta = t \exp\left(-\frac{Q_c}{RT}\right)$
  - ✓ Dorn observou que as curvas de fluência expressas por  $\varepsilon$  versus  $\theta$  obtidas à mesma tensão e diferentes temperaturas serão superpostas numa única curva
  - ✓ Na ruptura,  $t = t_R$  e  $\theta = \theta_R$
  - ✓ Tomando os logaritmos ( $R \approx 2 \text{ calK}^{-1}\text{mol}^{-1}$ ):  
$$\log \theta_R = \log t_R - 0.217 Q_c \left(\frac{1}{T}\right) \quad (\text{Sherby-Dorn})$$

# PARÂMETRO TEMPO-TEMPERATURA E ESTIMATIVA DE VIDA

- **Parâmetro de Larson-Miller:**

- ✓ Rearranje os termos de  $\log \theta_R$  para obter

$$P_{LM} = 0,217Q_c = T(\log t_R + C),$$

onde:

$$C = -\log \theta_R$$

- ✓ O valor de  $C$  pode ser interpretado como o intercepto extrapolado em um gráfico de  $\log t_R$  versus  $1/T$

- ✓ Para calcular os valores de  $P_{LM}$  e  $C$  basta um mínimo de 2 pontos em cada linha de  $\sigma$

