



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

**COMPORTAMENTO MECÂNICO
DOS MATERIAIS
PARTE II**

PMT 2100 - Introdução à Ciência dos Materiais para Engenharia

2º semestre de 2010

Roteiro da Aula

- Efeito do tempo (taxa de deformação, esforços cíclicos) e da temperatura no comportamento mecânico dos materiais
 - ✓ Comportamento elástico, viscoso e viscoelástico
- Modelando viscoelasticidade
 - ✓ Relaxação de tensão
 - ✓ Fluência
- Efeito da temperatura no comportamento mecânico dos materiais (fluência)
- Efeito da taxa de deformação sobre o comportamento plástico
 - ✓ Impacto
 - ✓ Comportamento dúctil-frágil
- Esforços cíclicos
 - ✓ Fadiga

PARA APRENDER MAIS:

- Modelos de comportamento viscoelástico

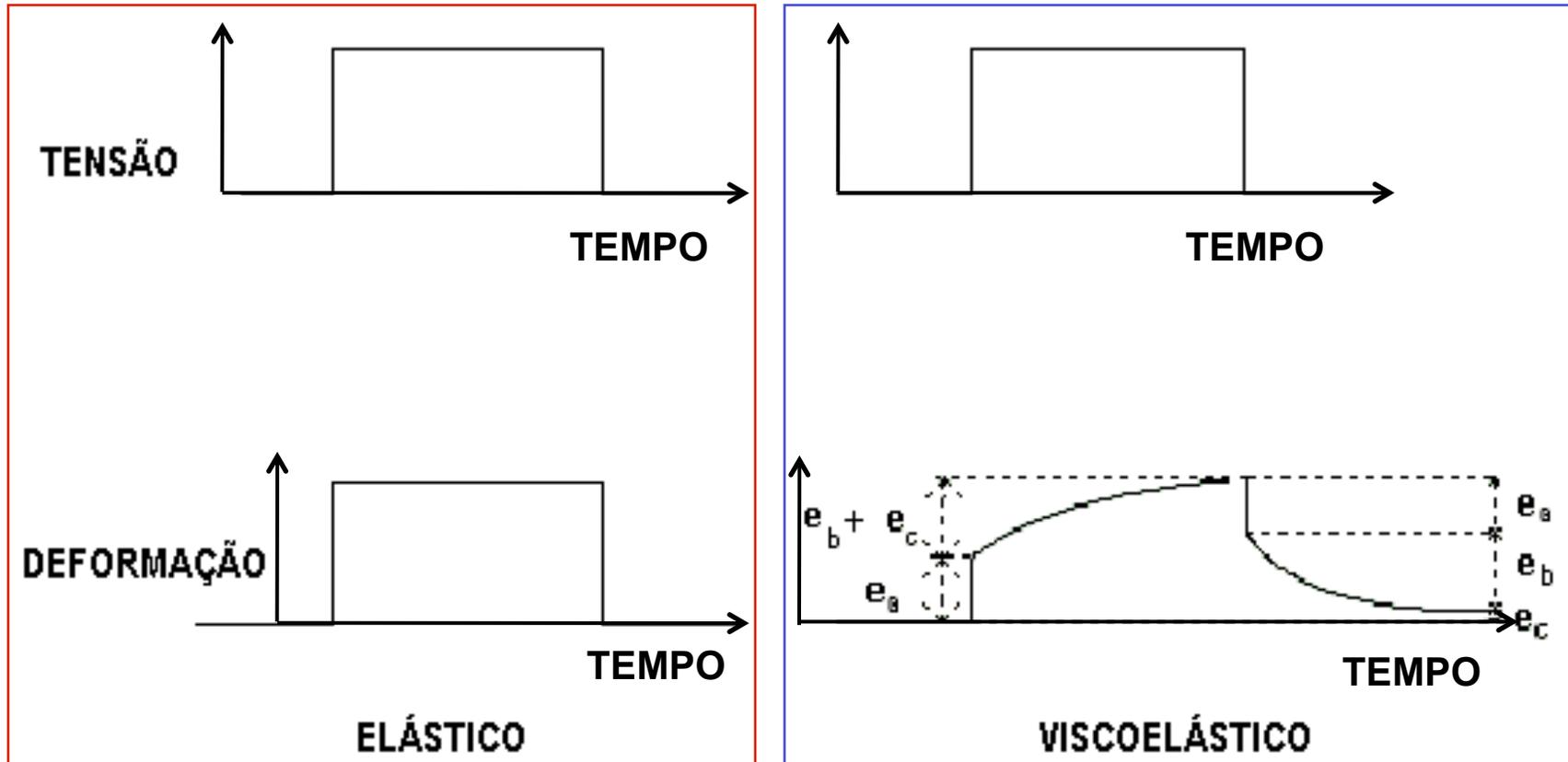
EFEITO DO TEMPO (*TAXA DE DEFORMAÇÃO, ESFORÇOS CÍCLICOS*) E DA TEMPERATURA NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS MATERIAIS

- As curvas de TENSÃO-DEFORMAÇÃO obtidas numa máquina universal de ensaios mecânicos são muito úteis, mas simplificadas quando comparadas às solicitações reais de um dado equipamento ou componente.

Estes ensaios não mostram a influência do meio, do tempo (taxa de deformação, esforços cíclicos) e da temperatura no comportamento do material na região elástica, importante para entender o desempenho do material em serviço.

- VISCOELASTICIDADE – modelar o comportamento mecânico dos materiais em função do TEMPO e TEMPERATURA.
- FLUÊNCIA – comportamento do material submetido a tensão inferior ao limite de escoamento por tempos longos e temperaturas elevadas.
- RESISTÊNCIA AO IMPACTO – comportamento do material submetido a tensão em tempos muito curtos.
- RESISTÊNCIA A FADIGA - comportamento do material submetido a tensões cíclicas inferiores ao limite de escoamento.
- INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA na fluência e na resistência a impacto.

Comportamento Viscoelástico

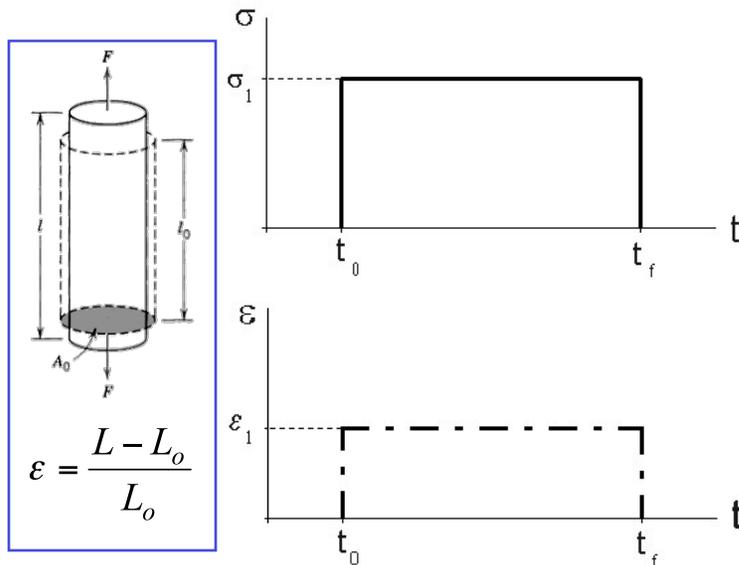


e_a – deformação elástica imediata – recuperável

e_b – deformação elástica retardada - recuperável

e_c – deformação por escoamento plástico – deformação permanente

Comportamento Elástico (sólido hookiano)

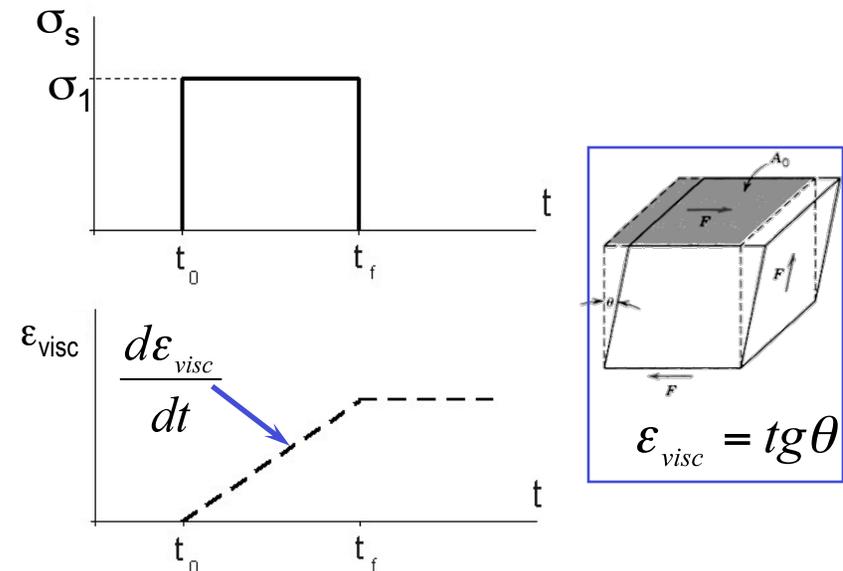


$$\sigma_1 = E \cdot \varepsilon_1$$

E = módulo de elasticidade [Pa]

Processo reversível \Rightarrow não
dissipa energia!

Comportamento Viscoso (líquido newtoniano)



$$\sigma_s = \eta \cdot \frac{d\varepsilon_{visc}}{dt}$$

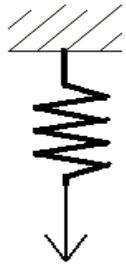
η = viscosidade [Pa.s]

Processo irreversível \Rightarrow
dissipa energia!

MODELANDO VISCOELASTICIDADE

- Sólido Hookiano

$$\sigma_1 = E \cdot \varepsilon_1$$



MOLA

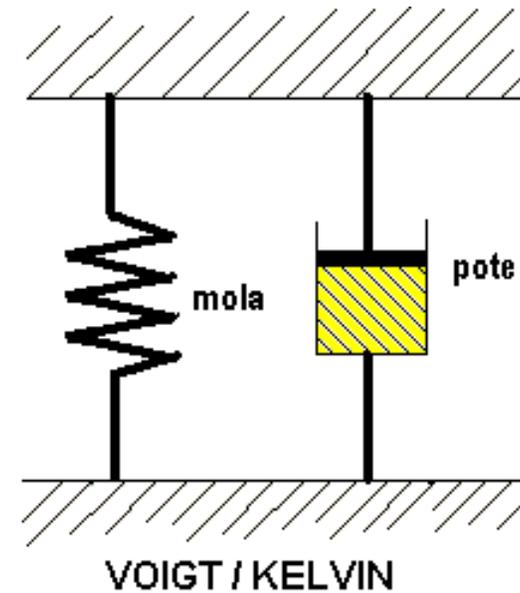
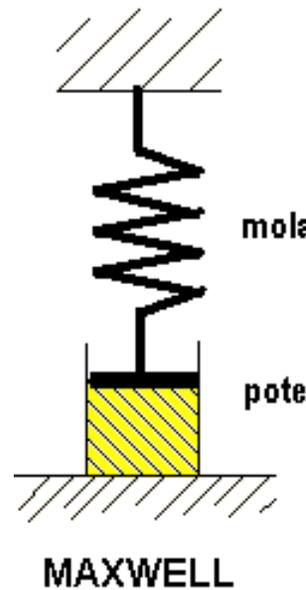
- Líquido Newtoniano

$$\sigma_s = \eta \cdot \frac{d\varepsilon_{visc}}{dt}$$



MODELOS MAIS SIMPLES:

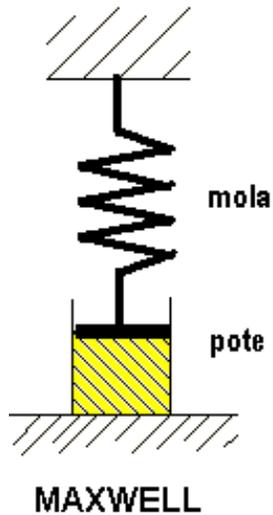
- duas unidades em série: relaxação da tensão aplicada.
- duas unidades em paralelo: deformação em função do tempo (fluência).



Modelo de Maxwell

modelo para descrever RELAXAÇÃO DE TENSÃO

Aplica-se uma deformação ϵ_0 e observa-se $\sigma(t)$



E e η são sensíveis a variação da temperatura.

Módulo de relaxação em função do tempo e da temperatura:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \exp(-t E / \eta)$$

$$\sigma(t) = \sigma_0 \exp(-t / \tau)$$

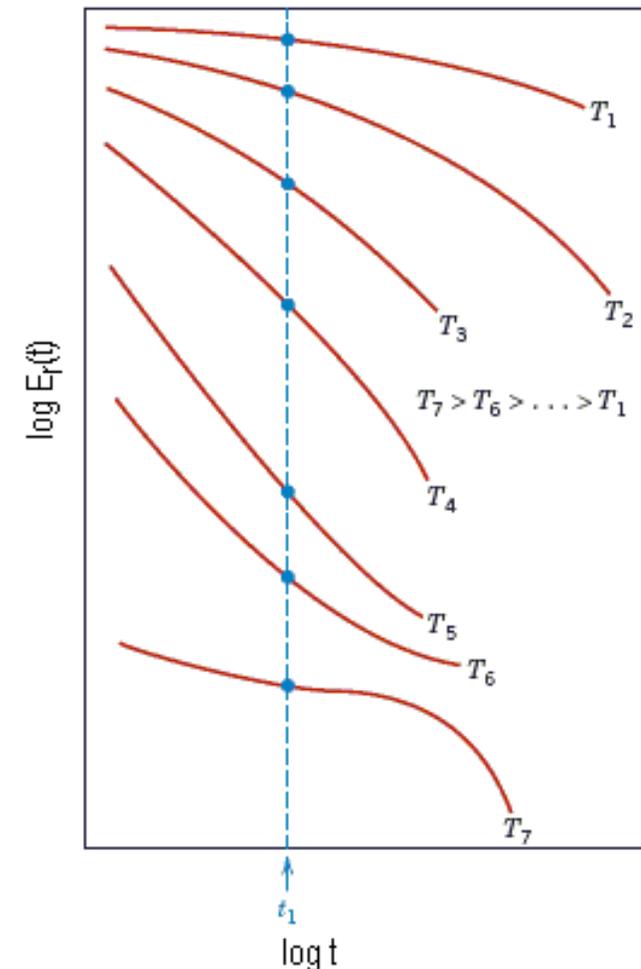
$$\tau = \text{tempo de relaxação} = \eta / E$$

Módulo de relaxação ($\epsilon_0 = \text{cte.}$)

$$E_r(t) = \sigma(t) / \epsilon_0$$

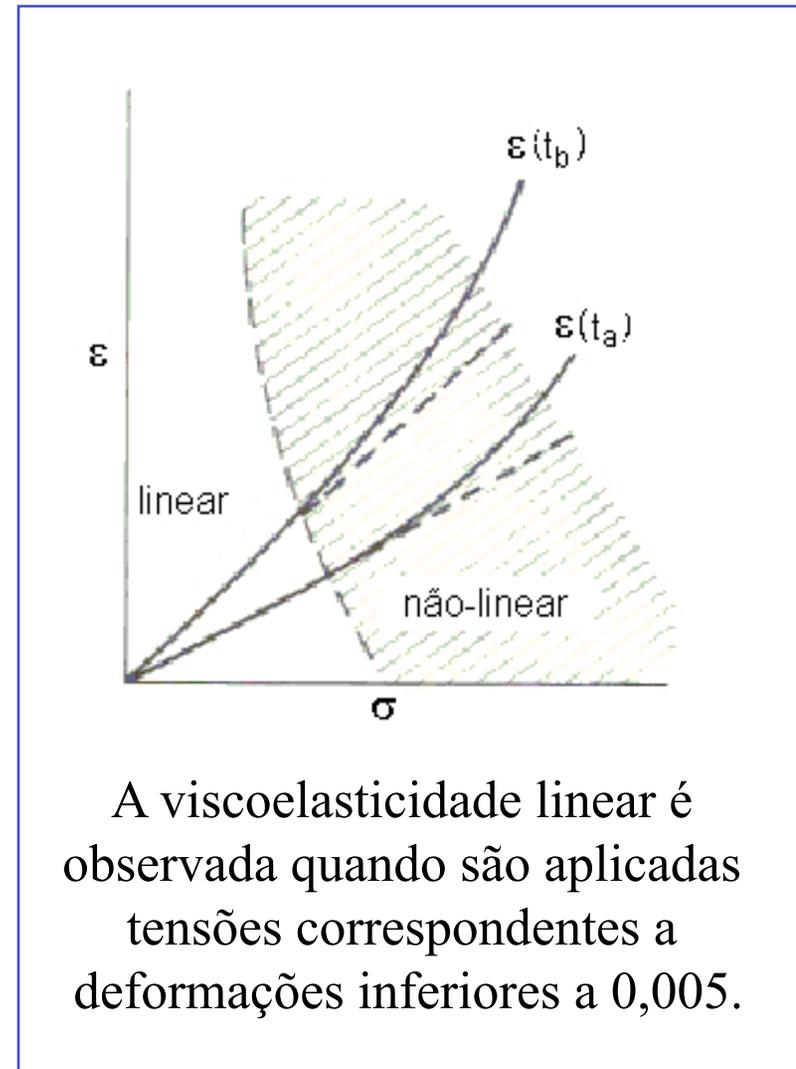
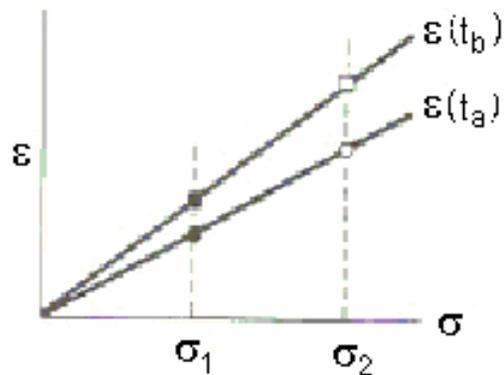
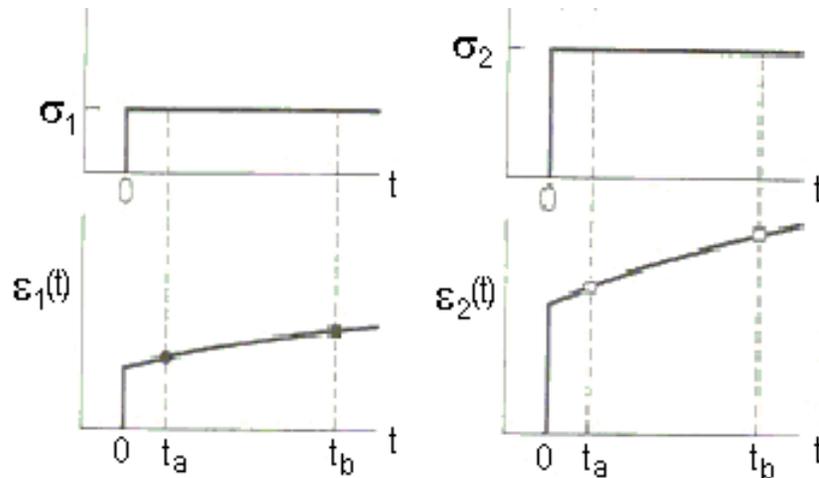
$E_r(t)$ e $\sigma(t)$ se reduzem com o tempo em cada temperatura.

Em temperatura maior, o tempo de relaxação é menor, e são menores $E_r(t)$ e $\sigma(t)$.



FLUÊNCIA

Aplica-se uma tensão σ_0 a uma dada temperatura e observa-se $\varepsilon(t)$

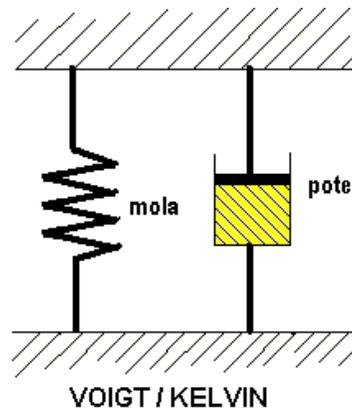


A viscoelasticidade linear é observada quando são aplicadas tensões correspondentes a deformações inferiores a 0,005.

Modelo de Voigt-Kelvin

modelo para descrever FLUÊNCIA

aplica-se uma tensão σ_0 em uma dada temperatura e observa-se $\varepsilon(t)$



G e η são sensíveis a variação da temperatura.

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \frac{1}{G} \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau_R}} \right]$$

σ_0 = tensão aplicada em $t = 0$ s

G = módulo de cisalhamento

τ_R = tempo de retardação = η/G

Módulo de fluência ($\sigma_0 = \text{cte.}$)

$$G_f(t) = \sigma_0 / \varepsilon(t)$$

Efeito da Temperatura na FLUÊNCIA

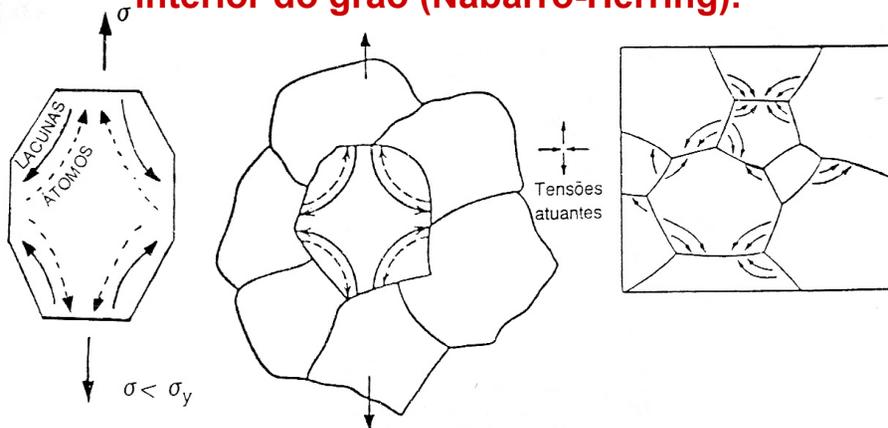
- Em **baixas temperaturas** (e em baixas taxas de deformação), uma deformação ϵ praticamente só depende da tensão σ .

Em **temperaturas altas** (e em baixas taxas de deformação), uma deformação ϵ depende não somente da tensão σ , mas também do tempo e da temperatura.

Alta temperatura: temperatura a partir da qual fenômenos difusivos de defeitos (difusão, ascensão de discordâncias, etc...) começam a se manifestar macroscopicamente.

- O limite entre “baixa temperatura” e “alta temperatura” varia de material para material.

Um dos mecanismos de fluência: por difusão no interior do grão (Nabarro-Herring).



Temperatura Homóloga (τ_H)

$$\tau_H = \frac{T}{T_F}$$

T = temperatura do material
 T_F = temperatura de fusão
 (dadas em K)

para metais: $\tau_H > 0,4 \rightarrow$ Alta Temperatura

Limite entre basse et haute température pour différents matériaux.

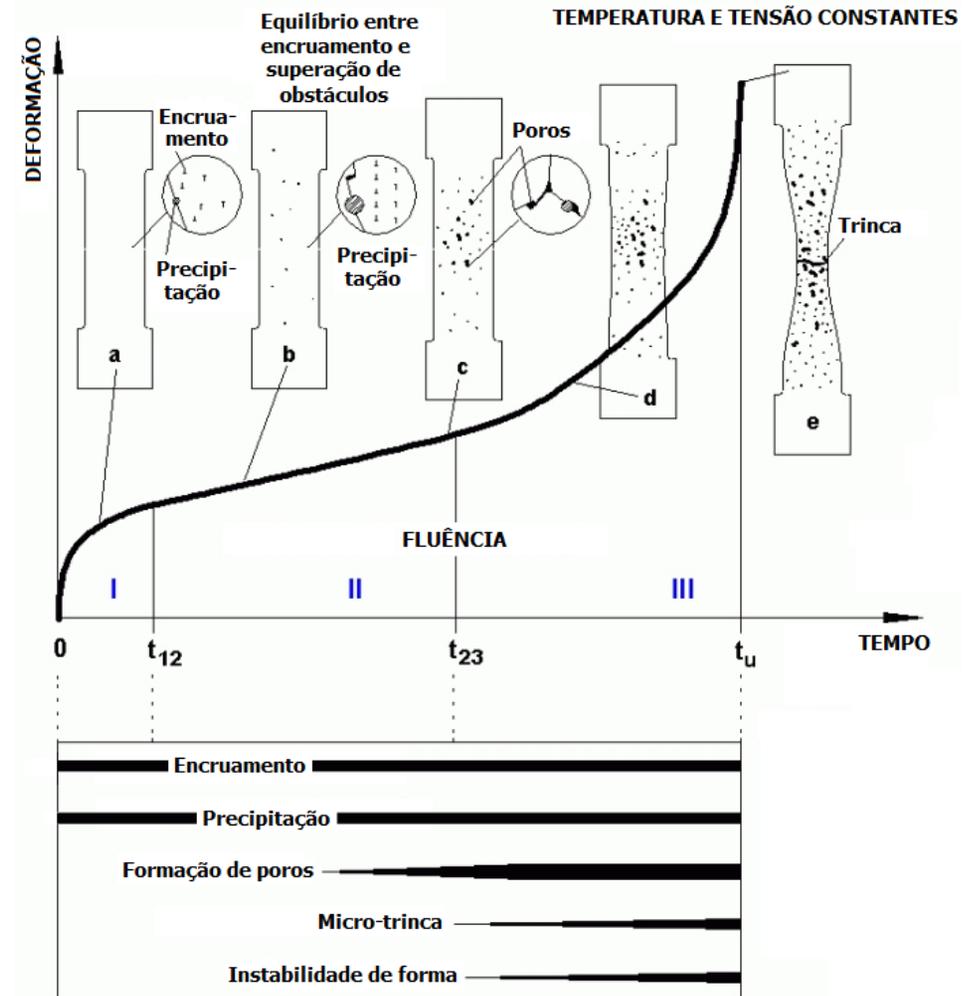
Matériaux	T_m K	T_g K	Métaux			Céramiques	Polymères
			$0,4 T_m$ K (°C)	$0,5 T_m$ K (°C)	$0,6 T_m$ K (°C)		
W	3680		1472 (1199)				
SiC	3110			1555 (1282)			
MgO	3073			1537 (1264)			
Mo	2880		1152 (879)				
Al ₂ O ₃	2323			1162 (889)			
Si ₃ N ₄	2173			1087 (814)			
Ti	1943		777 (504)				
Fe	1809		724 (451)				
Ni	1726		690 (417)				
Cu	1356		542 (269)				
Al	933		373 (100)				
PA aromatique (Kevlar)*	913	648					548 (275)
PEEK*	613	423					368 (95)
Pb	600		240 (-33)				
PC*	573	423					344 (71)
PETP*	543	343					326 (53)
PS*	513	373					308 (35)
PP*	443	258					266 (-7)
PE (HD)*	413	153					248 (-25)
Hg	235		94 (-179)				

Efeito da Temperatura sobre a Fluência

- Quando a temperatura é superior a $0,4 T_F$, os fenômenos difusivos tornam-se bastante significativos nos metais, e observam-se deformações plásticas em função do tempo, mesmo em tensões relativamente baixas. Esse é o fenômeno da **FLUÊNCIA**.

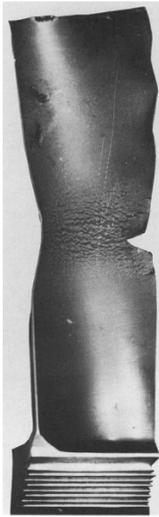
CURVA DE FLUÊNCIA

- Estágio I** ou **TRANSIENTE**: taxa de deformação $d\varepsilon/dt$ **decrecente**; efeito do encruamento
- Estágio II** ou **ESTACIONÁRIO**: taxa de deformação $d\varepsilon/dt$ (**constante**) é mínima; equilíbrio entre o encruamento e a superação de obstáculos por processos difusivos (por exemplo, ascensão de discordâncias)
- Estágio III** ou **TERCIÁRIO**: taxa de deformação $d\varepsilon/dt$ **crescente**; desenvolvimento de **cavidades (poros)** que **levam à ruptura do material**

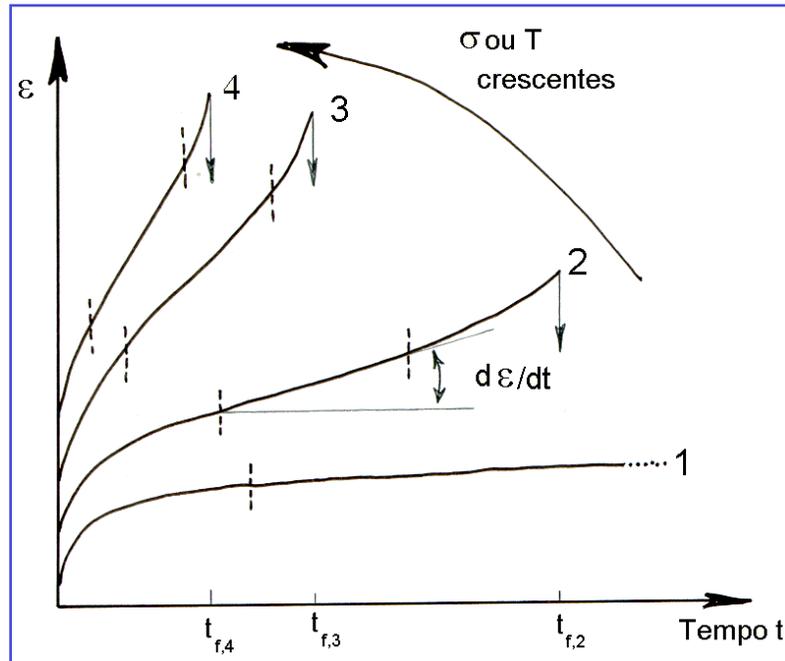


<http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Kriechen-Werkstoffvorgaenge.jpg&filetimestamp=20051221164109>

Efeito da Temperatura e da Tensão sobre a Fluência



Falha por fluência de uma paleta de turbina de avião



$$T_4 > T_3 > T_2 > T_1$$



$$t_{f,4} < t_{f,3} < t_{f,2}$$

e

$$(\dot{\epsilon}_{\min})_1 < (\dot{\epsilon}_{\min})_2 < (\dot{\epsilon}_{\min})_3 < (\dot{\epsilon}_{\min})_4$$

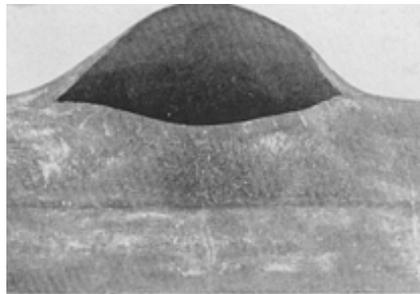
$$\sigma_4 > \sigma_3 > \sigma_2 > \sigma_1$$



$$t_{f,4} < t_{f,3} < t_{f,2}$$

e

$$(\dot{\epsilon}_{\min})_1 < (\dot{\epsilon}_{\min})_2 < (\dot{\epsilon}_{\min})_3 < (\dot{\epsilon}_{\min})_4$$



(a)

Falha por fluência de uma tubulação

- Obs.: no caso 1 o material **não rompe** no intervalo coberto pelo gráfico, e poderia permanecer por todo o tempo de operação sem quebrar.

Efeito da Tensão e da Temperatura sobre a Fluência - Estágio II (estado estacionário)

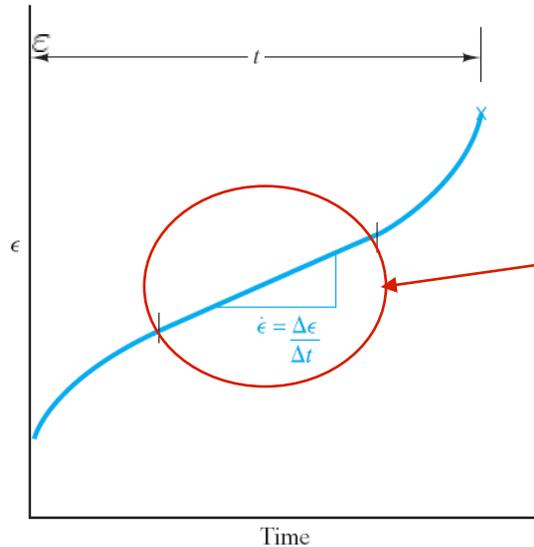


Figure 6-35 Simple characterization of creep behavior is obtained from the secondary-stage strain rate ($\dot{\epsilon}$) and the time to creep rupture (t).

Equação empírica geral:

C, **m** e **b** são constantes do material e **d** é o tamanho de grão (quando aplicável)

Q é a energia de ativação para fluência e **R** e **T** são constante dos gases e temperatura absoluta.

$$\dot{\epsilon} = \frac{C\sigma^m}{d^b} e^{\frac{-Q}{RT}}$$

A equação pode ser linearizada com a aplicação do logaritmo, que é uma equação de Arrhenius.

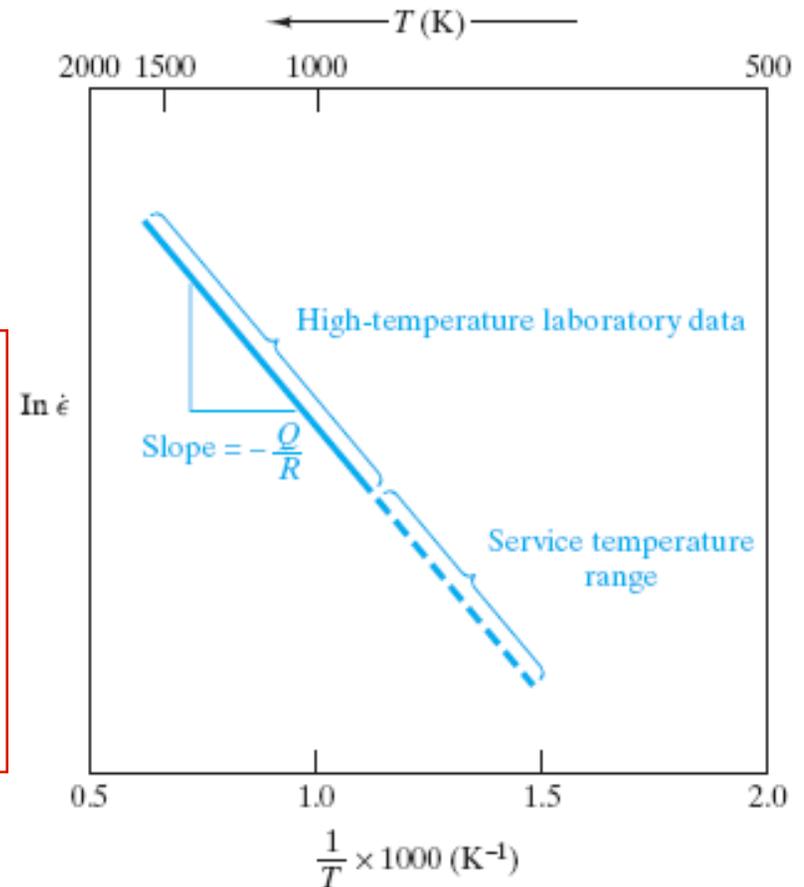


Figure 6-34 Arrhenius plot of $\ln \dot{\epsilon}$ versus $1/T$, where $\dot{\epsilon}$ is the secondary-stage creep rate and T is the absolute temperature. The slope gives the activation energy for the creep mechanism. Extension of high-temperature, short-term data permits prediction of long-term creep behavior at lower service temperatures.

Outros Fatores que afetam a fluência em metais

- ✓ Estrutura cristalina: \uparrow complexa \Rightarrow \uparrow resistência à fluência
- ✓ Precipitados: \uparrow fração \Rightarrow \uparrow resistência à fluência
- ✓ Contornos de grão: \uparrow tamanho de grão \Rightarrow \uparrow resistência à fluência



← Pá de turbina para aviões a jato com grãos orientados feita por solidificação direcional

Pá de turbina monocristalina: o canal em forma de espiral permite que apenas um grão cresça na peça →



Fonte: <http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2001/slides.IB/photo.html>

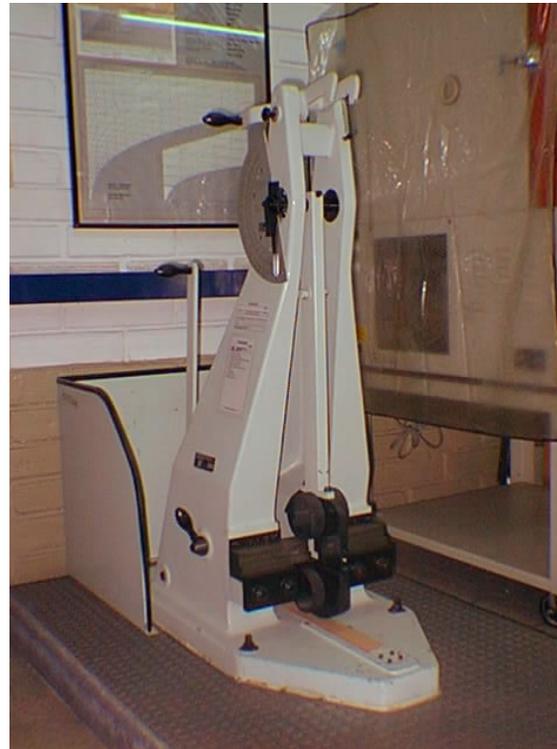
IMPACTO

Ensaio de tração convencional: $\dot{\varepsilon} \approx 10^{-5} \sim 10^{-1} \left[s^{-1} \right]$

Solicitações de impacto: $\dot{\varepsilon} \approx 10^2 \sim 10^4 \left[s^{-1} \right]$



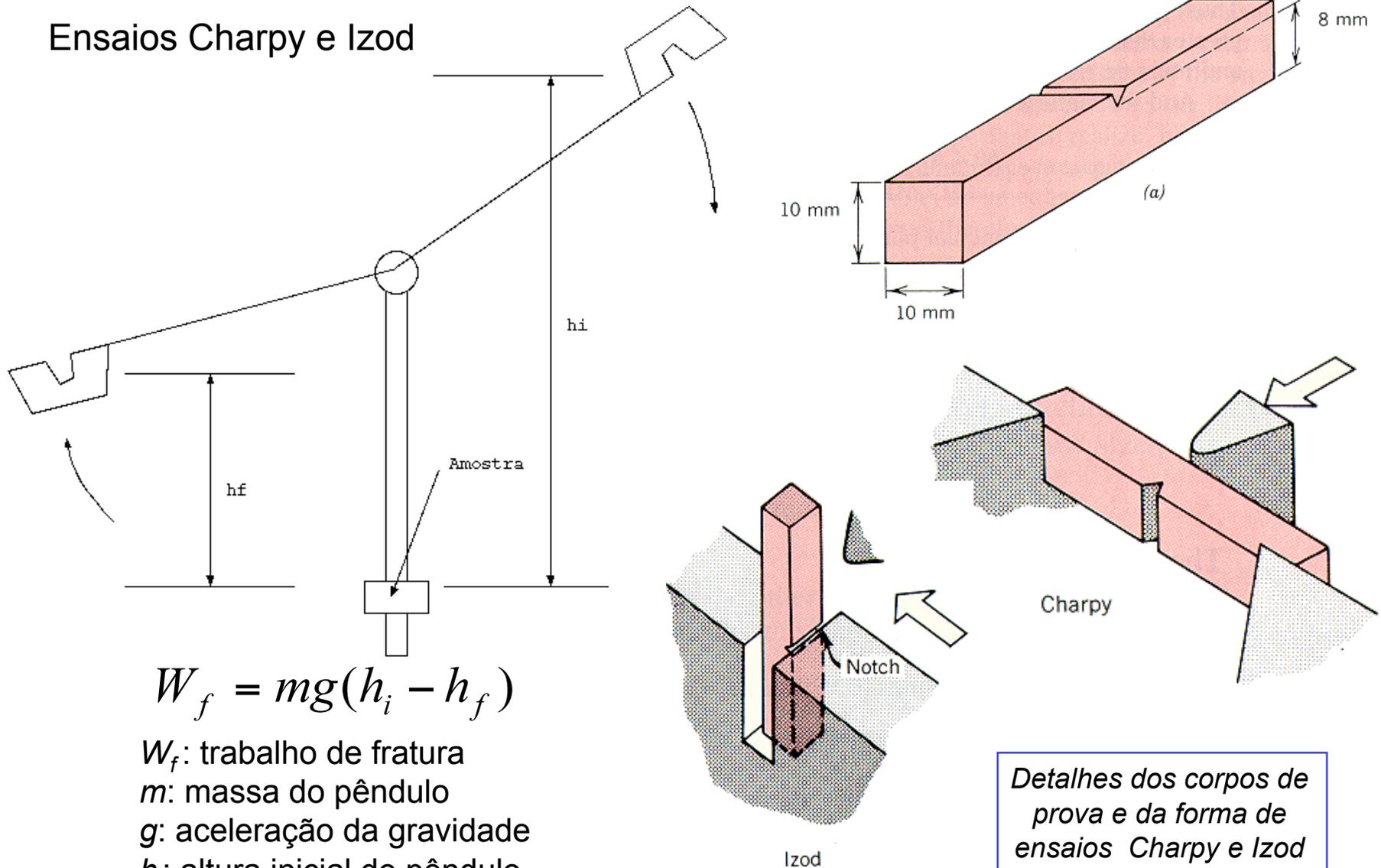
**PÊNDULO PARA
PLÁSTICOS,
LEITURA DIGITAL**



**PÊNDULO PARA
METAIS, LEITURA
ANALÓGICA**

Ensaio de impacto (Pêndulo)

Ensaaios Charpy e Izod



$$W_f = mg(h_i - h_f)$$

W_f : trabalho de fratura

m : massa do pêndulo

g : aceleração da gravidade

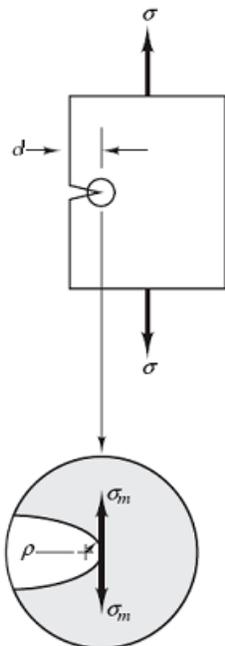
h_i : altura inicial do pêndulo

h_f : altura final do pêndulo

Detalhes dos corpos de prova e da forma de ensaios Charpy e Izod

Efeito da concentração de tensões na fratura

- As resistências à fratura medidas para a maioria dos materiais frágeis são significativamente menores do que aquelas calculadas a partir das energias das ligações atômicas.
- A presença de defeitos e trincas (pequenos e frequentemente microscópicos), no corpo ou na superfície do material, implica em amplificação da tensão na extremidade do defeito. A magnitude da concentração de tensões depende da geometria e da orientação do defeito.



• O entalhe introduz um fator de concentração de tensões f_c que pode ser expresso pela equação de Keating.

• Nestas condições a tensão máxima σ_{\max} é dada pela equação de Griffith.

$$f_c = 1 + 2 \left(\frac{d}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}}$$

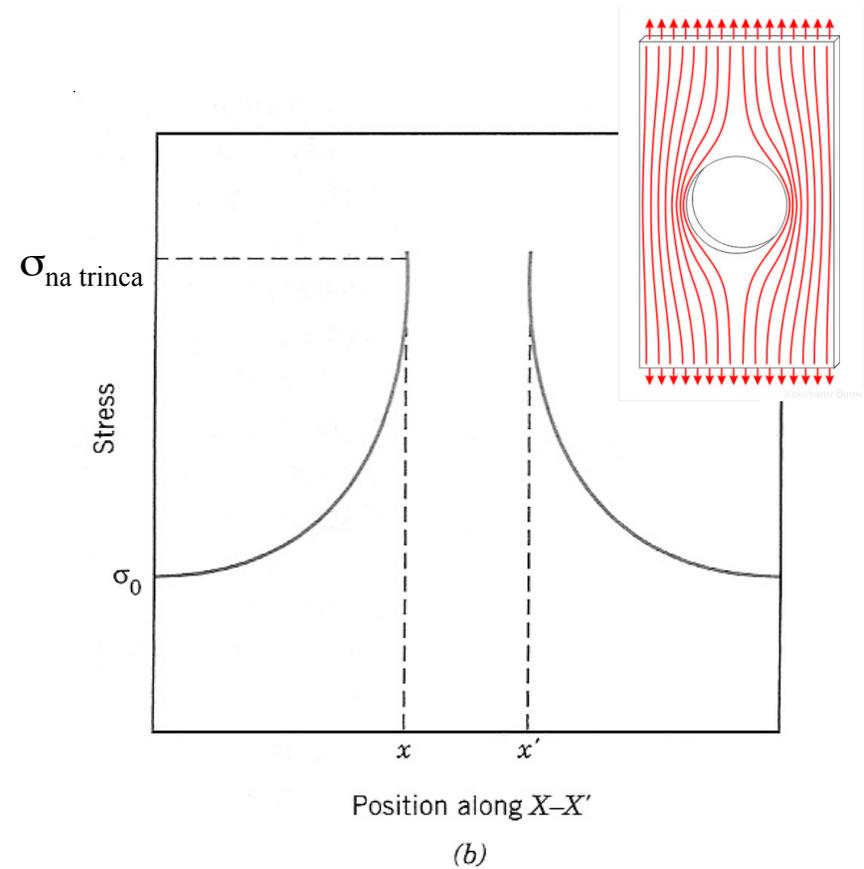
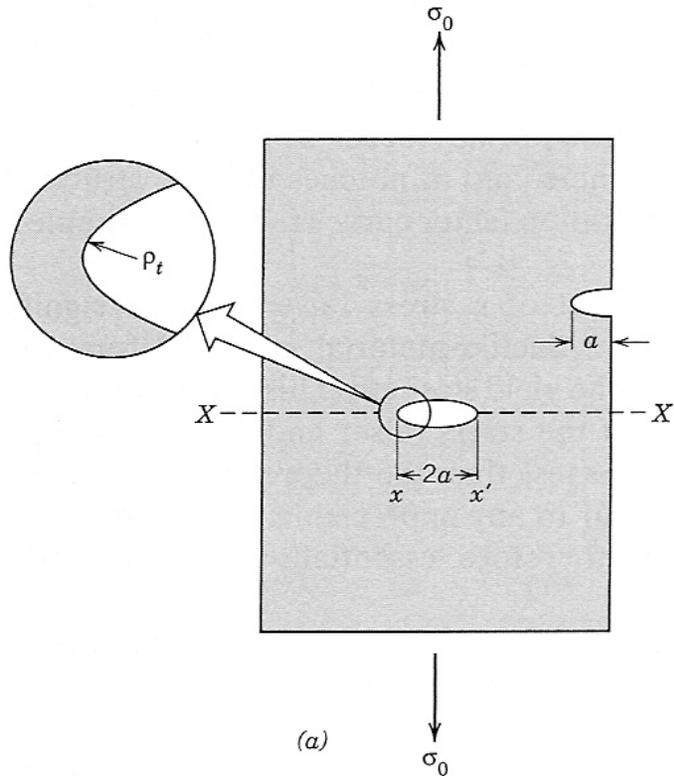
$$\sigma_{\max} = 2\sigma \left(\frac{d}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}}$$

d = profundidade do entalhe

ρ = raio da extremidade do entalhe
(pode ser microscópico)

σ = tensão aplicada

Concentração de tensões numa **trinca elíptica** e Resistência a Fratura K_{Ic}



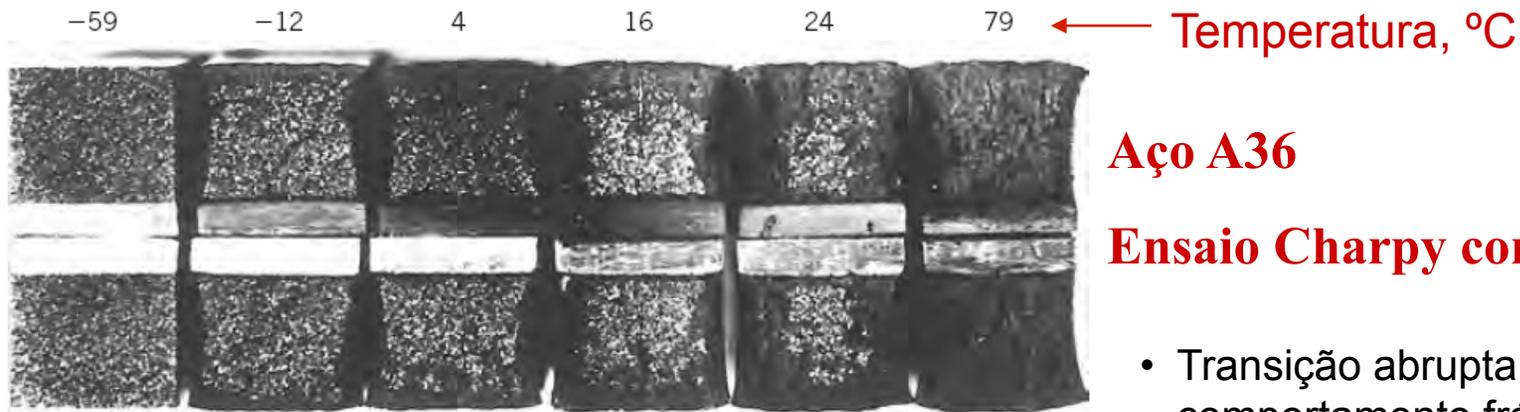
$$K_{Ic} = C \sigma_o \sqrt{\pi a_c}$$

K_{Ic} = tenacidade a fratura

σ_o = tensão aplicada

a_c = tamanho crítico da trinca

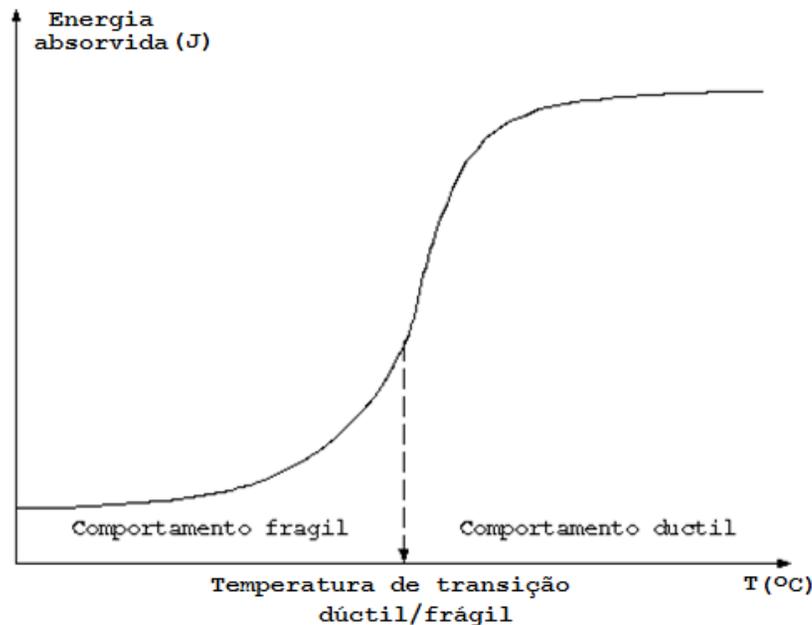
TRANSIÇÃO DÚCTIL-FRÁGIL



Aço A36

Ensaio Charpy com entalhe V

Energia absorvida no ensaio Charpy em função da temperatura



- Transição abrupta de um comportamento frágil, em baixa temperatura, para um comportamento dúctil, em alta temperatura.
- Depende fortemente da geometria da amostra e do critério para definição da **temperatura de transição** ⇒ cuidado em projeto para que um material não sofra essa transição em operação.
- Pode ser observada em metais CCC e HC, polímeros e em cerâmicas (em temperaturas elevadas).

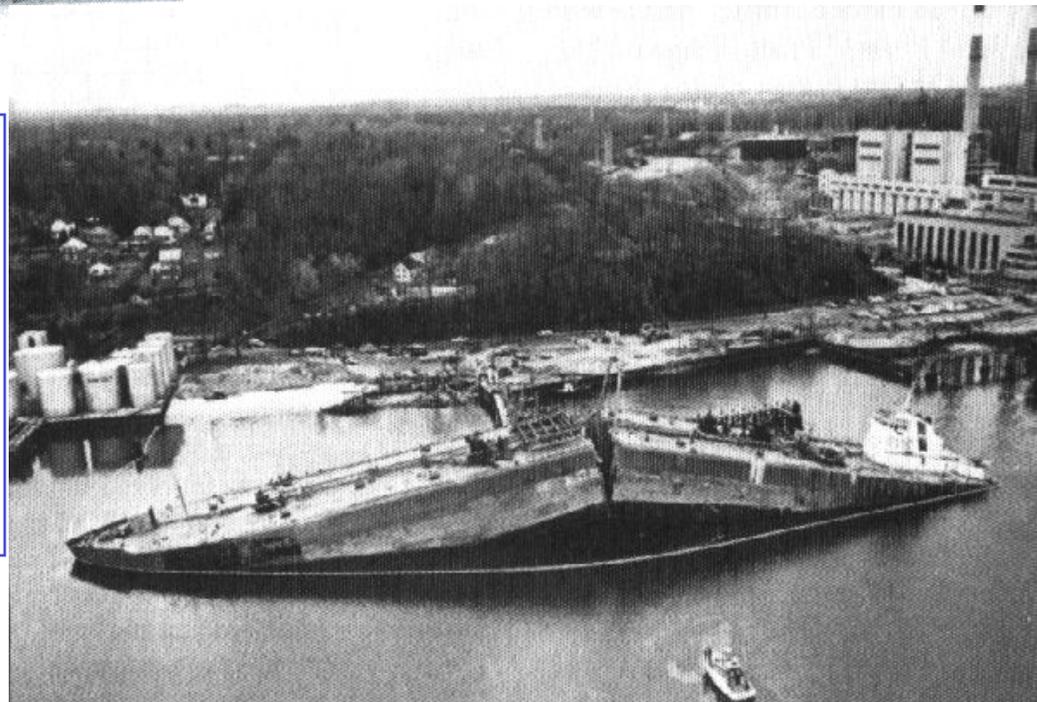
Transição Dúctil-Frágil



Ruptura de uma ponte metálica no Canadá, acontecida em 1951. A estrutura rompeu de forma frágil numa noite de inverno (-30°C), num momento em que a ponte não estava sequer submetida a uma grande solicitação.

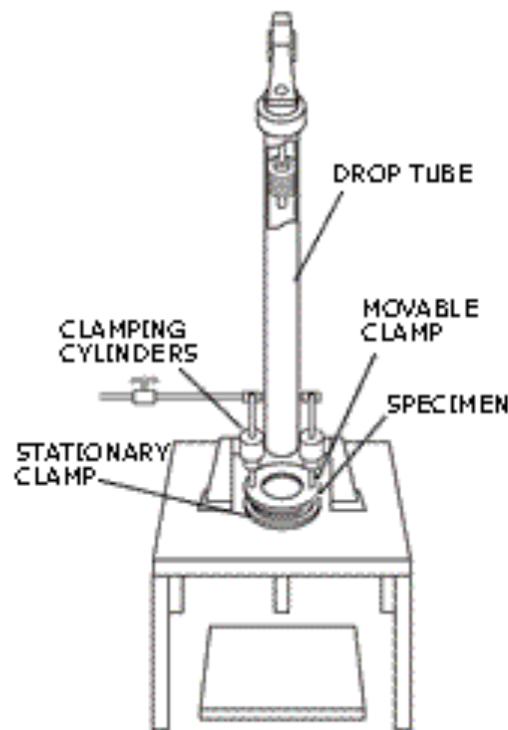
- Não se deve construir estruturas utilizando materiais que apresentem a temperatura de transição dúctil-frágil acima da temperatura de serviço, para evitar fraturas frágeis e catastróficas.

‘Liberty ships’ = navios que rompiam ao meio durante a fabricação por soldagem. Os navios foram fabricados para transportar alimentos, remédios e vestimentas para os aliados dos EUA na Europa. Alguns navios romperam ao meio durante a fabricação, outros durante a viagem para a Europa e outros chegaram intactos.



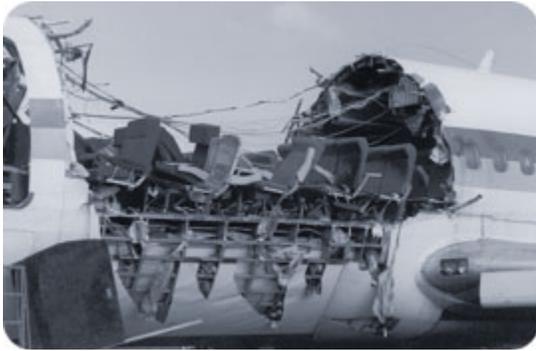
Ensaio de Impacto

ENSAIO DE QUEDA DE PESO (*Drop-Weight Test*)



- Um peso é lançado de uma altura pré-estabelecida em queda livre sobre a amostra.
- O resultado é qualitativo \Rightarrow quebra ou não quebra (alternativamente, deforma ou não deforma, trinca ou não trinca,...)
- Permite determinar a **TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO PARA DUCTILIDADE NULA** (NDT, nil ductility transition temperature) \Rightarrow interessante em projeto de engenharia para aplicações em temperaturas **sub-zero**.

Fadiga



- Até o momento, foram estudadas *solicitações estáticas ou monotônicas* (a força mantém-se constante ou cresce ou decresce *continuamente*).
- Nas aplicações de engenharia, entretanto, freqüentemente encontram-se *solicitações cíclicas* (ex. eixos, molas, asas de avião, bio-implantes, ...), que implicam em um **processo de falha denominado de FADIGA**.
- A *fadiga* é responsável por um grande número das falhas mecânicas observadas nos componentes de engenharia e por um grande número de acidentes com vítimas fatais.
- A fadiga ocorre com um componente submetido a solicitações dentro do regime elástico (isto é, para tensões inferiores ao limite de escoamento) → o fenômeno deve ser levado em conta em projetos de engenharia.
- A fadiga ocorre em todas as classes de materiais (metálicos, cerâmicos, poliméricos e compósitos).

Ensaio de fadiga

Máquina servo-hidráulica de ensaio de fadiga



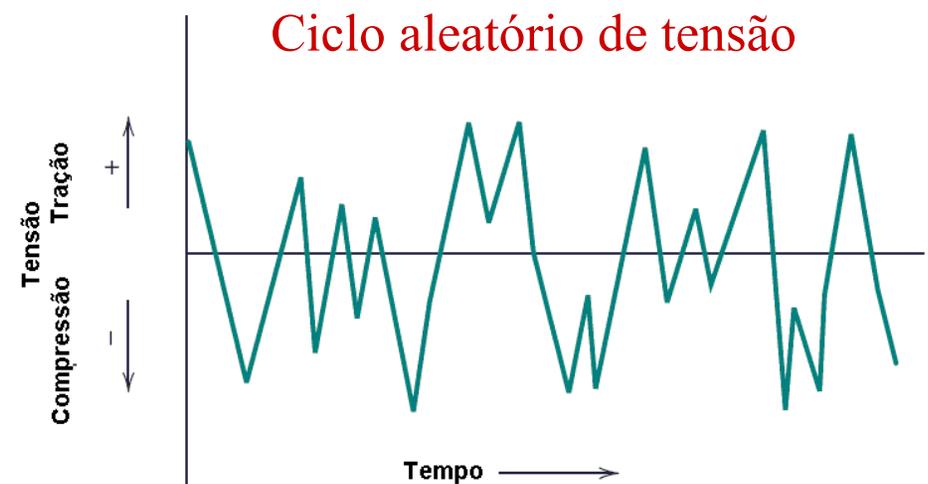
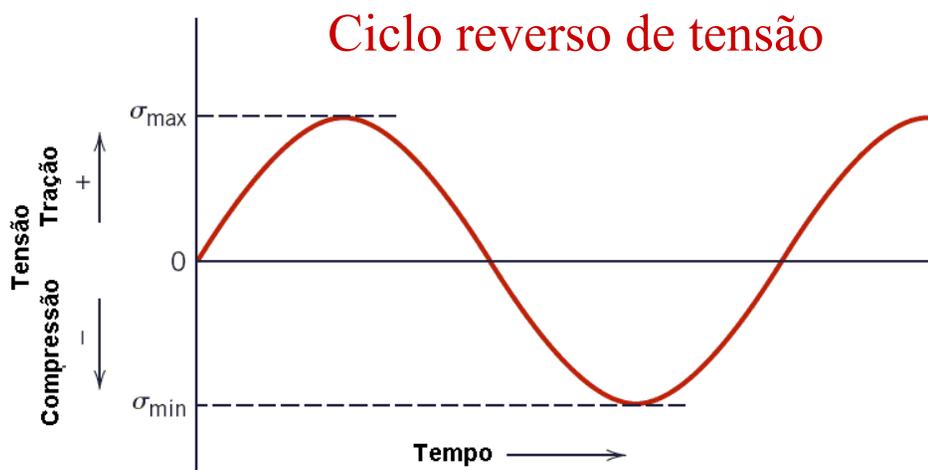
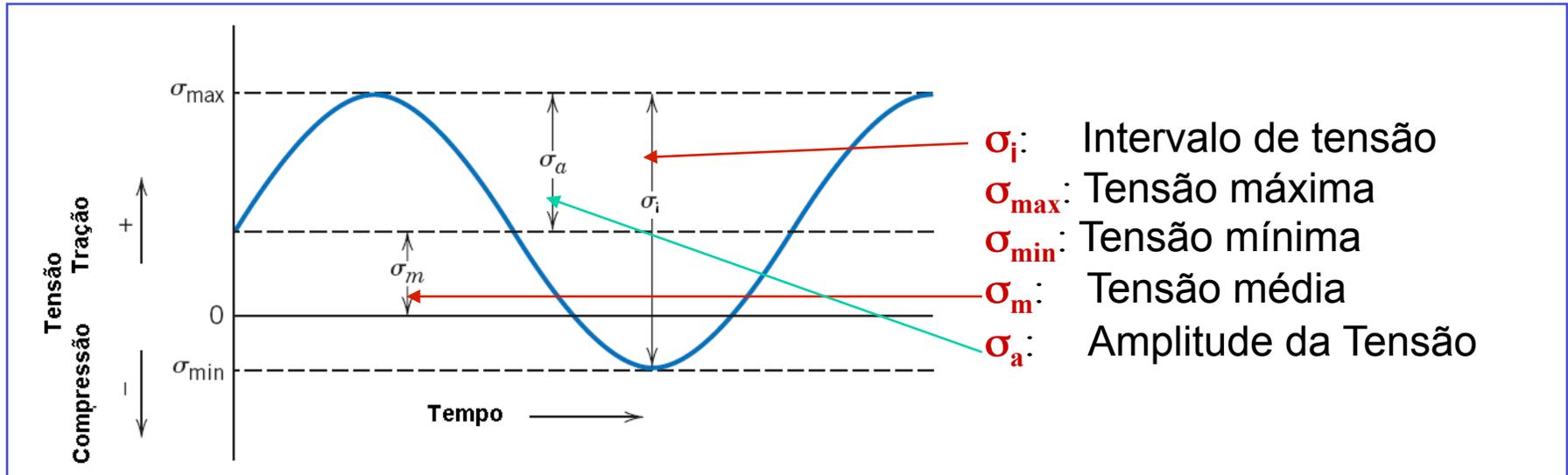
Corpos de prova antes e depois do ensaio



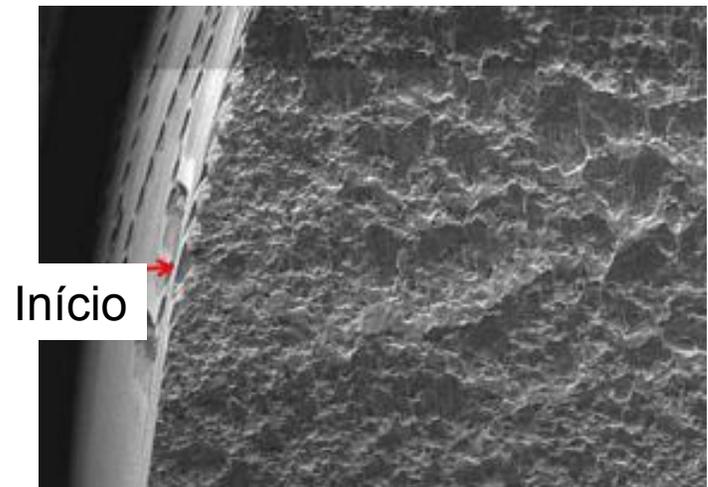
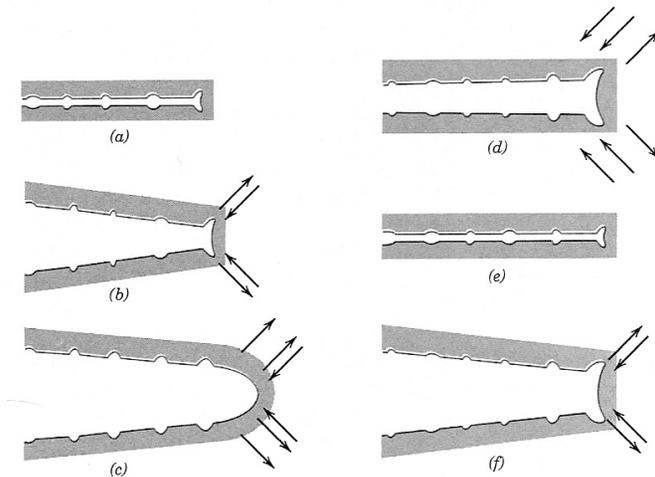
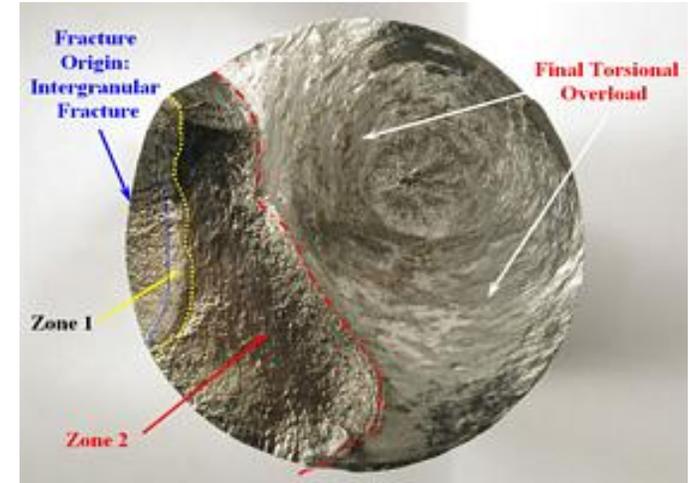
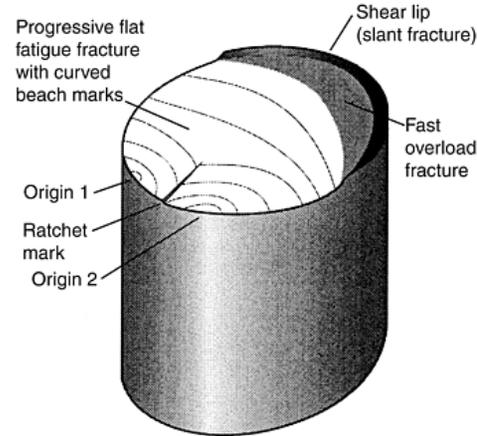
Ensaio de fadiga a quente em material resistente ao calor



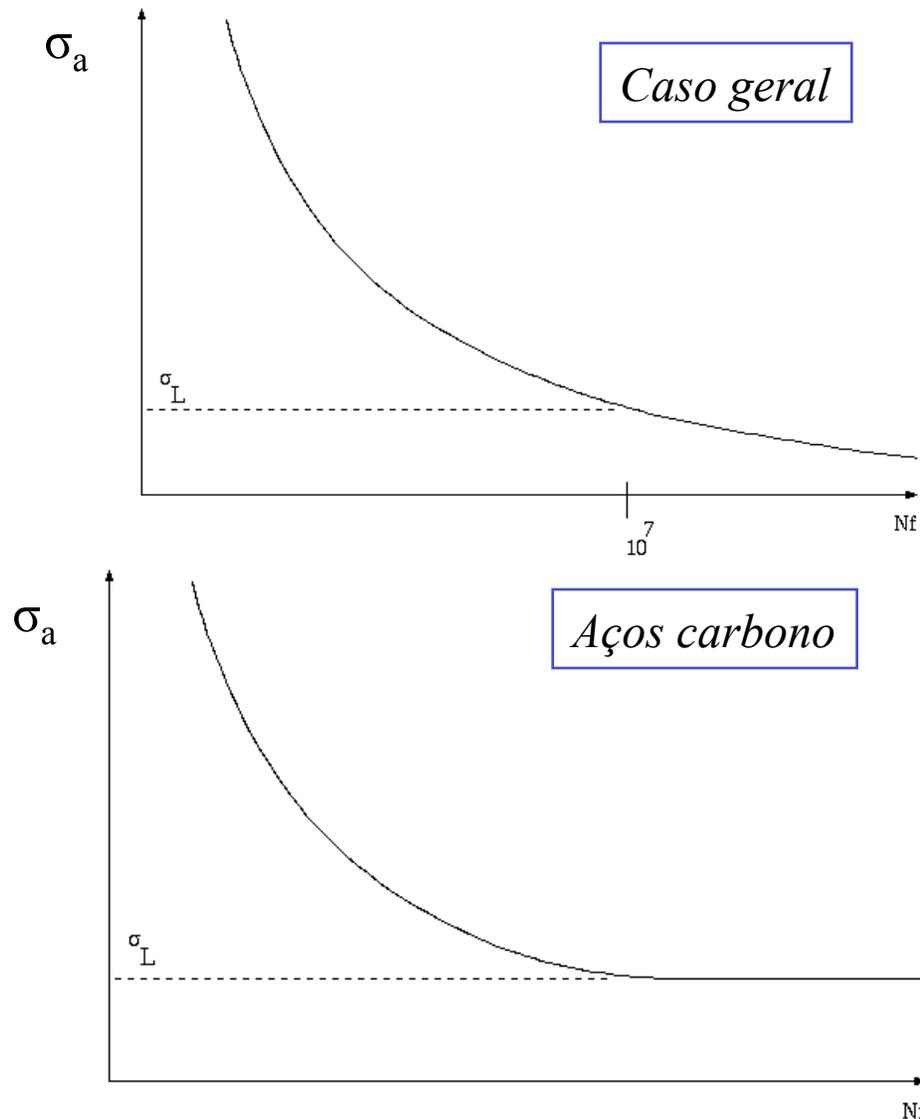
Parâmetros da Solicitação Cíclica



Mecanismo de propagação de trinca por fadiga



Curva σ -N (curva de Wöhler)



- O ensaio é realizado em frequência constante e com um valor de $\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ fixo para um grande número de amostras em cada nível de amplitude de tensão.
- Faz-se o gráfico do número médio de ciclos necessários para a ruptura do material.
- Define-se o limite de fadiga (σ_L , *endurance limit*) como sendo o nível de amplitude de tensão abaixo do qual não se observa a ruptura por fadiga.
- Para aços-carbono, aços baixa liga e ferros fundidos há um limite de fadiga bem definido, para os demais materiais convencionam-se um número de 10^7 ciclos para a definição do limite de fadiga.

LIMITE DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO E LIMITE DE FADIGA

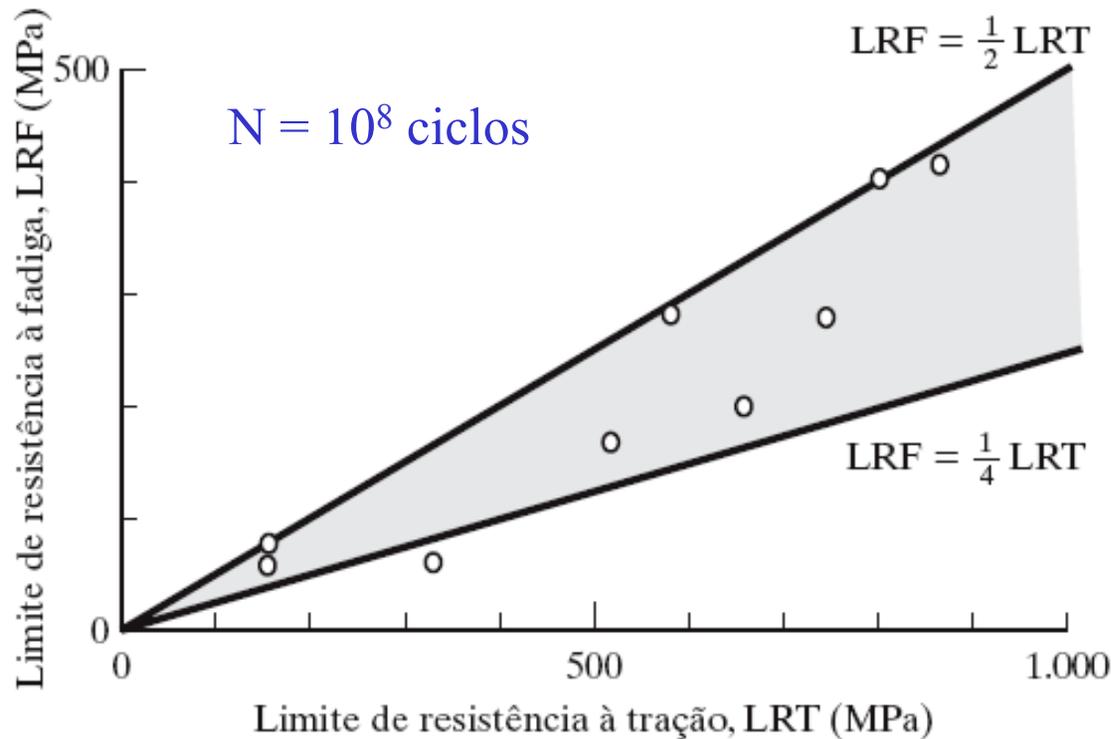


Figura 8.16 Gráfico dos dados da Tabela 8.4 que mostra como o limite de resistência à fadiga geralmente vale de um quarto à metade do limite de resistência à tração.

Para muitas ligas metálicas existe uma correlação entre o limite de resistência a tração e o limite de fadiga

Tabela 8.4 Comparação entre o limite de resistência à fadiga (LRF) e o limite de resistência à tração (LRT) para algumas das ligas da Tabela 6.1

Liga	LRF (MPa)	LRT (MPa)
1. Aço carbono 1040	280	750
2. Aço 8630 de baixa liga	400	800
3. a. Aço inoxidável 304		515
3. b. Aço inoxidável 304	170	
7. a. Alumínio 3003-H14	62	150
8. b. Magnésio AM100A	69	150
9. a. Ti-5Al-2,5Sn	410	862
10. Bronze com alumínio, 9% (liga de cobre)	200	652
11. Monel 400 (liga de níquel)	290	579
12. Zinco AC41A	56	328

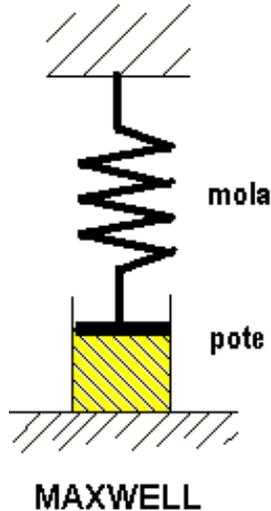
Resumo

- Entender o efeito do tempo e da temperatura no comportamento mecânico dos materiais é importante para prever o seu desempenho em serviço.
- Os modelos mecânicos compostos por elementos hookianos e newtonianos são importantes para compor equações que simulam o comportamento viscoelástico dos materiais, cuja resposta depende da taxa de deformação.
- A curva de fluência apresenta 3 estágios, cujas taxas de deformação podem ser descritas como: decrescente, estacionária e crescente.
- O segundo estágio da curva de fluência caracteriza-se pela dependência em relação à tensão aplicada e temperatura, de acordo com a equação experimental:
$$\dot{\epsilon} = \frac{C\sigma^m}{d^b} e^{\frac{-Q}{RT}}$$
- Os ensaios de fluência, resistência a impacto e resistência a fadiga ajudam a prever o comportamento do material em serviço.

PARA APRENDER MAIS :
viscoelasticidade

Modelo de Maxwell

modelo para descrever relaxação de tensão



A tensão σ é imposta para uma deformação fixa ϵ .

A deformação total num modelo de Maxwell é aditiva:

$$\epsilon = \epsilon_{\text{elast}} + \epsilon_{\text{visc}}$$

para tração: $\epsilon_{\text{elast}} = \sigma/E$ e $d\epsilon_{\text{visc}}/dt = \sigma/\eta$

E = módulo de elasticidade

$$\rightarrow d\epsilon/dt = (1/E)(d\sigma/dt) + \sigma/\eta$$

Considerando uma deformação constante ($d\epsilon/dt = 0$):

$$d\sigma/dt + E \sigma/\eta = 0 \quad \text{ou} \quad d\sigma/dt = -E \sigma/\eta$$

$$\sigma(t) = \sigma_0 \exp(-t E/\eta)$$

$$\sigma(t) = \sigma_0 \exp(-t/\tau)$$

Módulo de relaxação

$$E_r(t) = \sigma(t) / \epsilon_0$$

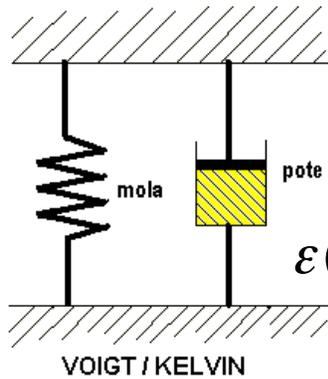
Integrando e tomando a tensão inicial igual a tensão imposta σ_0

$$\sigma(t) = \sigma_0 e^{-t \frac{E}{\eta}}$$

Quando $t = \eta/E$, o valor original da tensão fica reduzida em $1/e$ ($e = 2,718$), $\sigma = 0,3679\sigma_0$, e o tempo t é conhecido como **tempo de relaxação τ** .

Modelo de Voigt-Kelvin

modelo para descrever fluência



$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \frac{1}{G} \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau_R}} \right]$$

PARA APRENDER MAIS:
viscoelasticidade

Os componentes MOLLA e POTE partilham a tensão e são sujeitos a mesma deformação:

$$\sigma = \sigma_{\text{elástico}} + \sigma_{\text{viscoso}}$$

$$\sigma = G\varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt}$$

$$\frac{\sigma}{\eta} = \frac{G\varepsilon}{\eta} + \frac{d\varepsilon}{dt}$$

$$\frac{G}{\eta} dt = \frac{d\varepsilon}{\frac{\sigma}{G} - \varepsilon}$$

Integrando :

$$\frac{G}{\eta} t = \ln \frac{\frac{\sigma}{G}}{\frac{\sigma}{G} - \varepsilon}$$

e rearranjando:

$$\frac{\sigma}{G} = \left(\frac{\sigma}{G} - \varepsilon \right) e^{\frac{G}{\eta} t} \Rightarrow \varepsilon = \frac{\sigma}{G} \left[1 - e^{-\frac{Gt}{\eta}} \right]$$

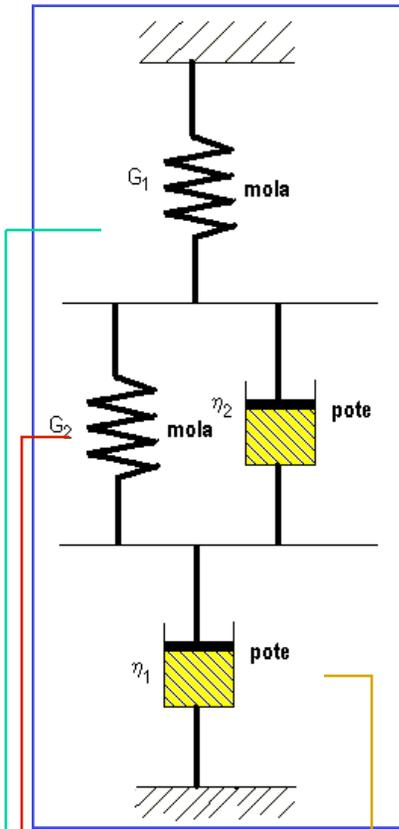
e para $t = 0 \rightarrow \sigma = \sigma_0$ e $\varepsilon = 0$:

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \frac{1}{G} \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau_R}} \right]$$

$\tau_R = \eta/G$ é o *tempo de retardação* e está relacionado com o intervalo de tempo entre a aplicação da tensão e a deformação.

Modelo de 4 elementos modelo para descrever FLUÊNCIA aplica-se uma tensão σ_o e observa-se $\epsilon(t)$

PARA APRENDER MAIS:
viscoelasticidade



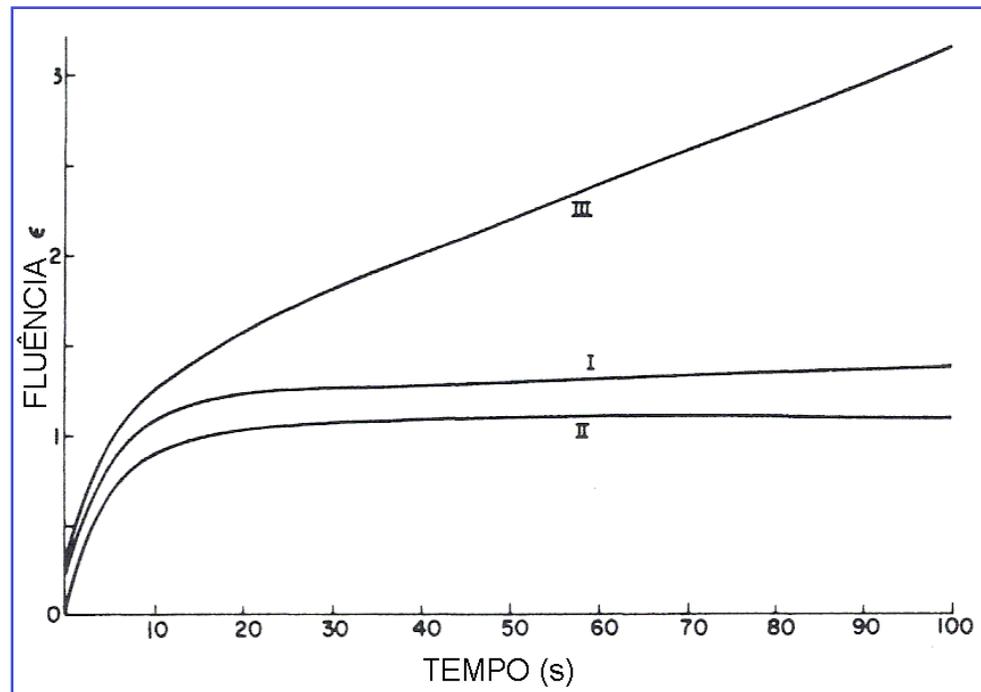
G e η são sensíveis a variação da temperatura.

$$\epsilon = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3$$

$$\epsilon = \frac{\sigma_o}{G_1} + \frac{\sigma_o}{G_2} \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau_R}} \right] + \frac{\sigma_o}{\eta_1} t$$

$\sigma_o =$ tensão aplicada em $t = 0$ s

Curva	G_1 (dinas/cm ²)	η_1 (P)	G_2 (dinas/cm ²)	η_2 (P)	σ_o (dinas/cm ²)
I	5×10^9	5×10^{11}	10^9	5×10^9	10^9
II	10^{11}	5×10^{11}	10^9	5×10^9	10^9
III	5×10^9	5×10^{10}	10^9	5×10^9	10^9



- **Capítulo do Callister (7^a ed.,2008) tratado nesta aula**
 - Comportamento viscoelástico : seção 15.4
 - Fluência : seção 8.12 a 8.15
 - Concentração de tensões : 8.5
 - Impacto : seção 8.6
 - Fadiga : seção 8.7 e 8.8

- Textos complementares indicados
 - Callister, 5 ed. :Comportamento viscoelástico : 16.7; Fluência : seção 8.13 a 8.15; Impacto : seção 8.6; Fadiga : seção 8.7 e 8.8
 - Shackelford, Ciência dos materiais, 6^a ed., 2008, Fluência: 6.5; Deformação viscoelástica: 6.6; Impacto e Fadiga: 8.1 a 8.3
 - Sperling, Introduction to physical polymer science, 4^a ed, 2006, Viscoelasticidade, capítulo 10: seção 10.1 a 10.1.2.2 e 10.2 a 10.2.3 e Apêndice 10.2 (Experiência: Viscoelasticidade do queijo)