



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

## COMPORTAMENTO MECÂNICO PARTE II

**PMT 2100 - Introdução à Ciência dos  
Materiais para Engenharia**  
**2º semestre de 2005**

## OBJETIVOS DA AULA

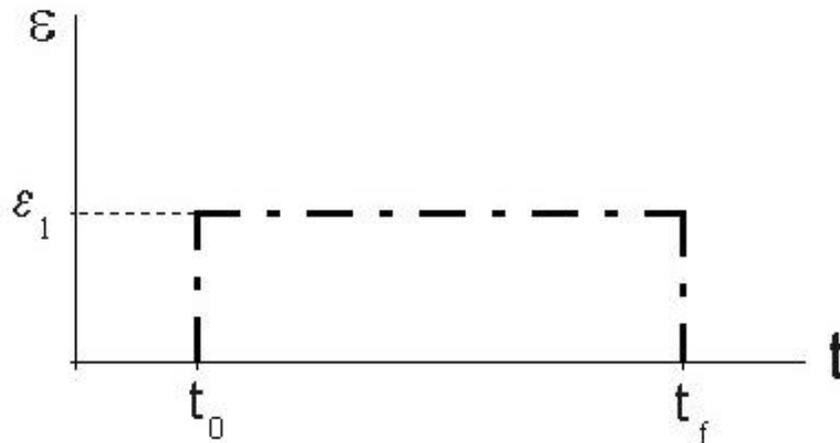
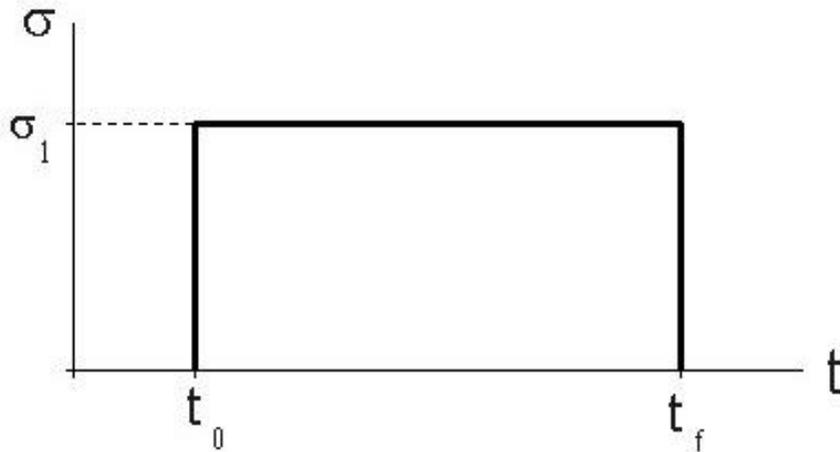
- Na primeira aula sobre propriedades mecânicas, foi estudado o comportamento mecânico dos materiais somente levando em conta os parâmetros **tensão** e **deformação**.
- Os ensaios estudados (tração, flexão, dureza) são muito úteis, mas são ensaios simplificados, porque não levam em conta efeitos de outros parâmetros, como o **tempo** e a **temperatura**. Aqueles ensaios não respondem perguntas como:
  - Como responderia o material se fosse submetido a uma tensão constante por um longo tempo?
  - Como responderia o material se a temperatura mudasse ao longo do tempo durante o qual ele é submetido a esforços mecânicos?
  - A velocidade de aplicação do esforço mecânico afeta o comportamento mecânico do material?
  - E se o esforço aplicado aumentasse e diminuísse ao longo do tempo? O que poderia acontecer?

*De forma bem sintética, o objetivo desta aula é observar o efeito do tempo e da temperatura no comportamento mecânico dos materiais*

## ROTEIRO DA AULA

- Comportamento mecânico ao longo do tempo de materiais submetidos a cargas estáticas
  - Comportamento elástico e visco-elástico
- Efeito da temperatura sobre o comportamento mecânico
  - Efeito da temperatura sobre a deformação plástica
  - Fluência
  - Temperatura versus taxa de deformação
- Efeito da taxa de deformação sobre o comportamento plástico
  - Impacto
  - Comportamento dúctil-frágil
- Esforços cíclicos
  - Fadiga

## Comportamento Elástico



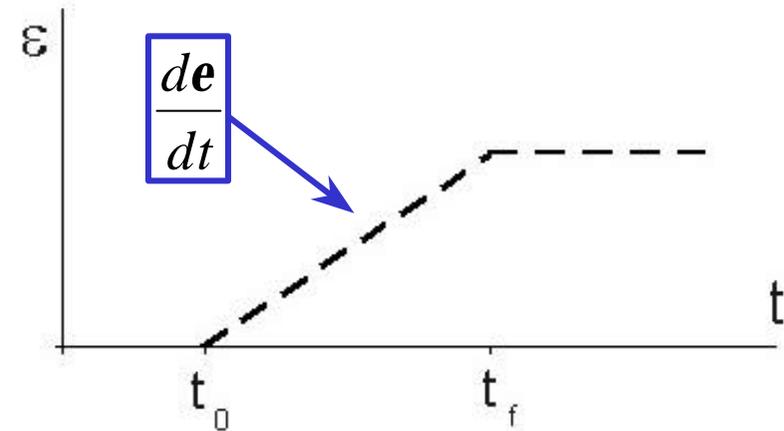
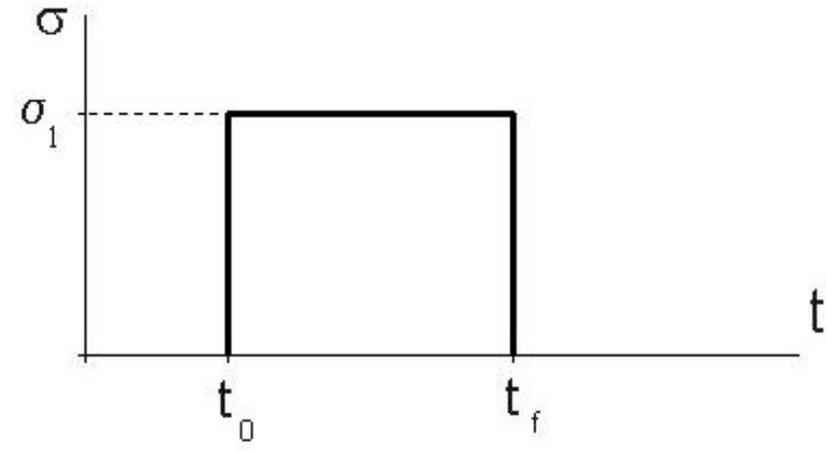
$$\epsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E}$$

$E$  = módulo de Young

Reversível  $\Rightarrow$  não dissipa energia!

4

## Fluxo Viscoso

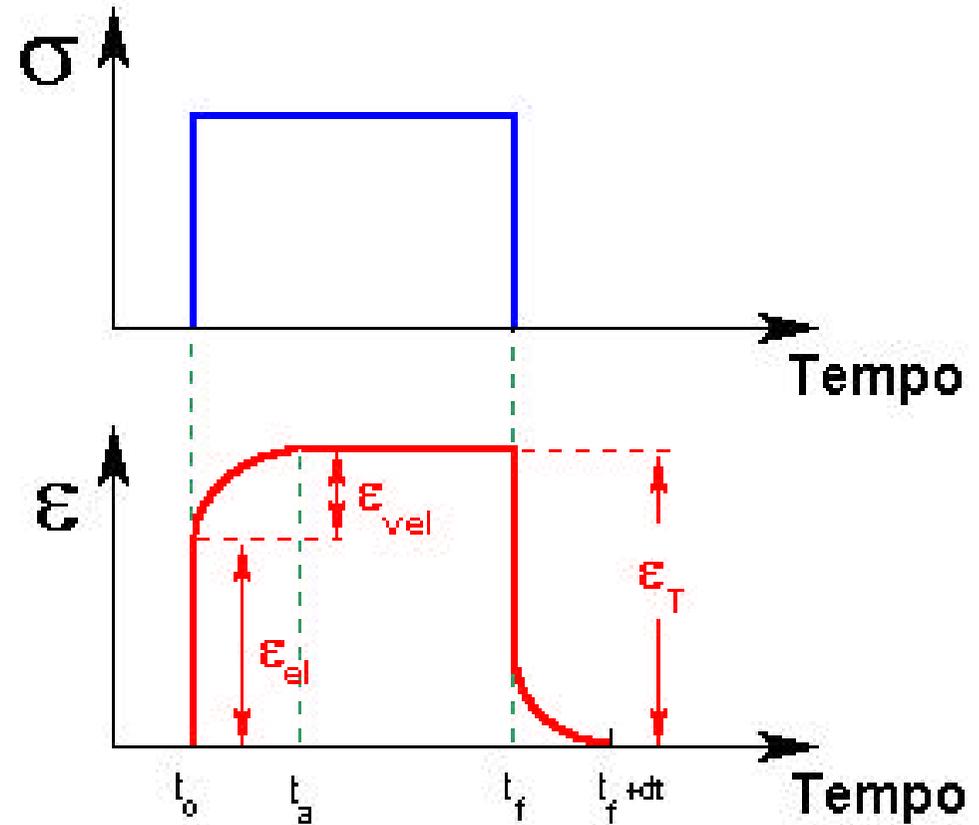
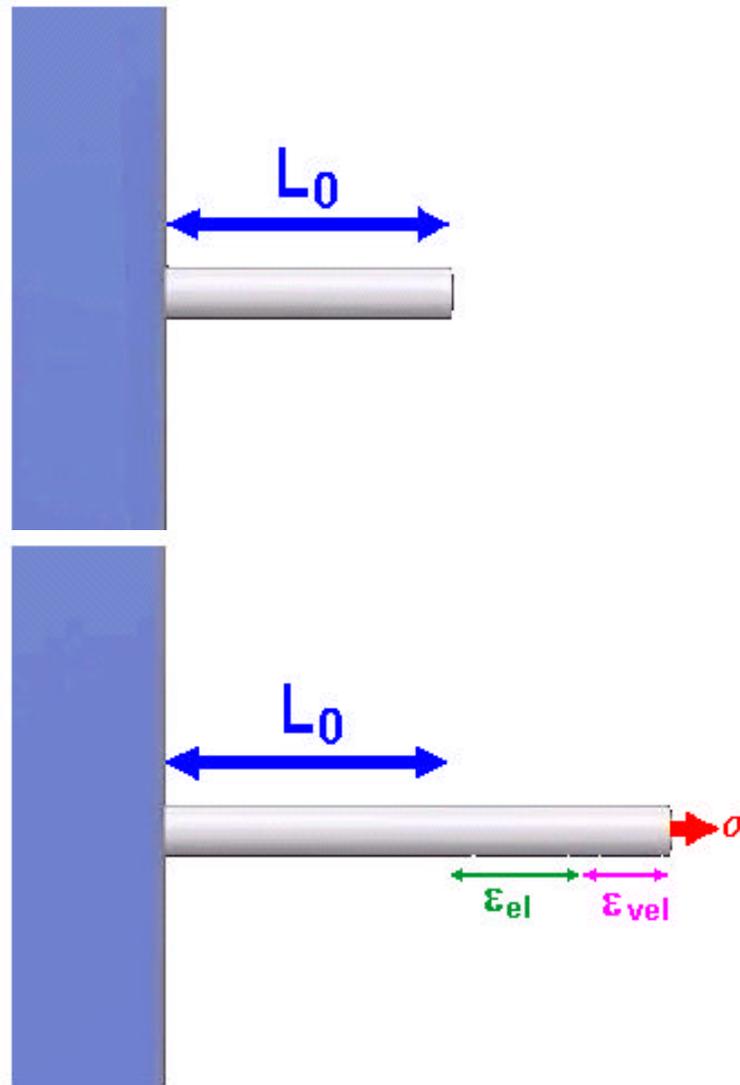


$h$  = viscosidade [Pa.s]

$$t = hg$$

Irreversível  $\Rightarrow$  dissipa energia

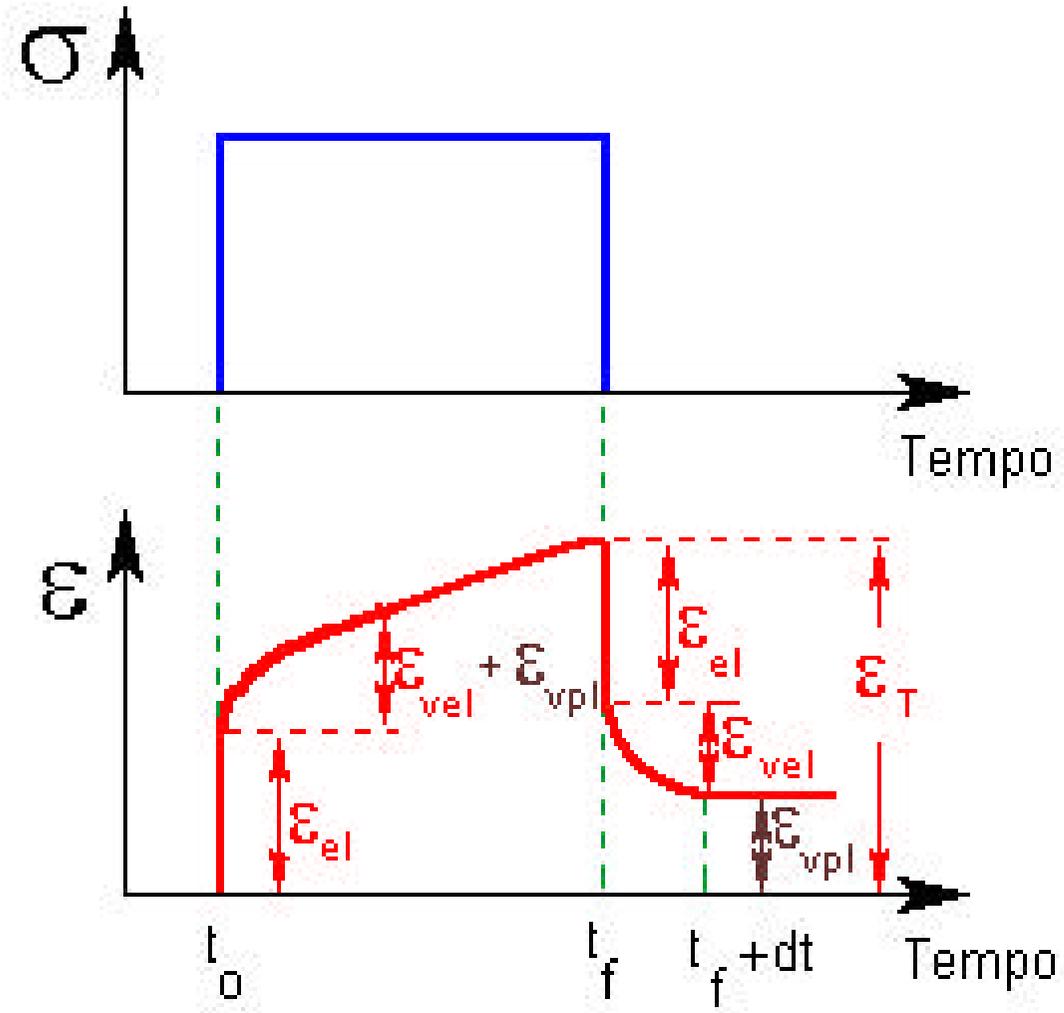
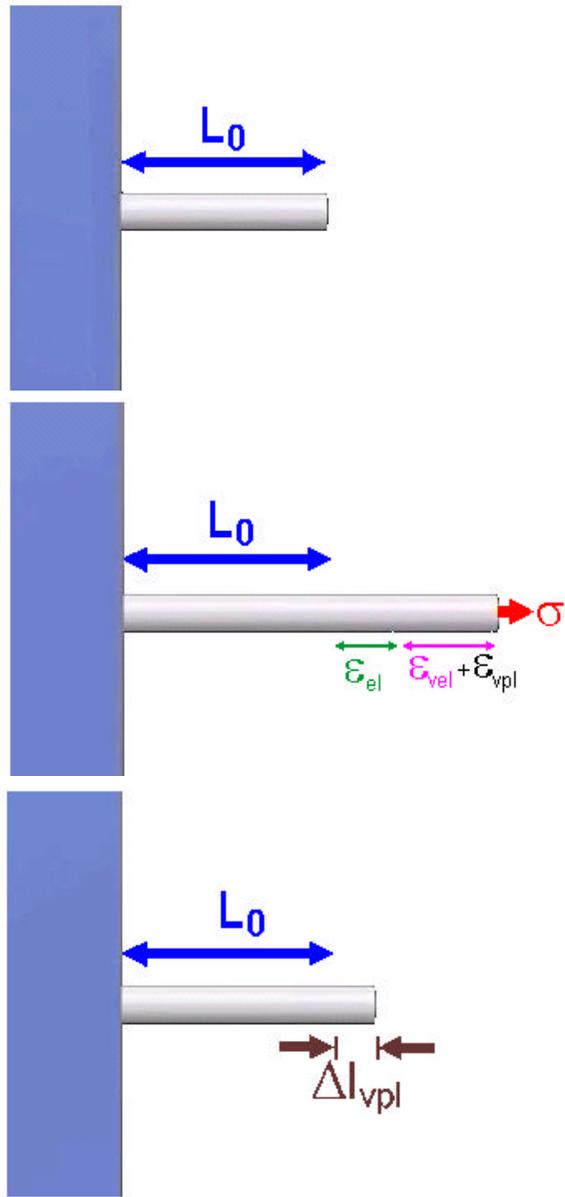
# Comportamento Visco-Elástico



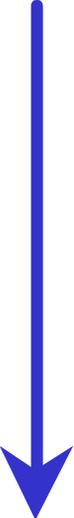
## Comportamento Visco-Elástico

- 
- Considere um corpo de prova de comprimento inicial  $L_0$ , que é submetido a um esforço  $\sigma$  no instante  $t_0$ .
  - Inicialmente ele sofre uma deformação instantânea, puramente elástica  $\epsilon_{el}$ , que obedece à lei de Hooke.
  - Se o esforço é mantido constante e também não varia com o tempo, uma deformação visco-elástica  $\epsilon_{vel}$  aparece ao longo do tempo, e se estabiliza num tempo  $t_a$ .
  - A deformação total  $\epsilon_T$  é igual à soma das duas deformações  $\epsilon_{el}$  e  $\epsilon_{vel}$ . Essa deformação permanece constante, até que o esforço  $\sigma$  seja eliminado no instante  $t_f$ .
  - Nesse instante, o corpo de prova sofre uma contração elástica praticamente instantânea, de valor absoluto igual a  $\epsilon_{el}$ .
  - Para que o corpo de prova volte às suas dimensões iniciais (ou seja, para que haja uma contração adicional em valor absoluto igual à deformação visco-elástica) é necessário um intervalo de tempo igual à  $dt = t_f - t_0$ .
  - No tempo  $t = t_f + dt$  o corpo de prova readquire suas dimensões iniciais, não existindo nenhuma deformação plástica residual.
  - O comportamento visco-elástico é reversível, mas dissipa parte da energia envolvida nas deformações.

# Comportamento Visco-Plástico



## Comportamento Visco-Plástico

- 
- Considere um corpo de prova de comprimento inicial  $L_0$ , que é submetido a um esforço  $\sigma$  no instante  $t_0$ .
  - Inicialmente ele sofre uma deformação instantânea, puramente elástica  $\epsilon_{el}$ , que obedece à lei de Hooke.
  - Se o esforço é mantido constante e também não varia com o tempo, deformações visco-elástica  $\epsilon_{vel}$  e visco-plástica  $\epsilon_{vpl}$  aparece ao longo do tempo. A deformação visco-elástica se estabiliza depois de certo tempo, o que não ocorre com a deformação visco-plástica: ela cresce continuamente com o tempo.
  - A deformação total  $\epsilon_T$  é igual à soma das deformações  $\epsilon_{el}$ ,  $\epsilon_{vel}$  e  $\epsilon_{vpl}$ .
  - A deformação cresce continuamente com o tempo, até que o esforço  $\sigma$  seja eliminado no instante  $t_f$ .
  - Nesse instante, o corpo de prova sofre uma contração elástica praticamente instantânea, de valor absoluto igual a  $\epsilon_{el}$ .
  - A contração referente à deformação visco-elástica ocorre num intervalo de tempo  $dt$ .
  - No tempo  $t = t_f + dt$  o corpo de prova não readquire suas dimensões iniciais, apresentando uma deformação permanente  $\Delta l_{vpl}$  (deformação plástica).
  - O comportamento visco-elástico é irreversível, ocorrendo dissipação de energia no processo de deformação.

## Efeito da temperatura sobre a deformação plástica

- Em baixas temperaturas (*e em baixas taxas de deformação*), uma deformação  $\varepsilon$  praticamente só depende da tensão  $\sigma$ .
- Em temperaturas altas (*e em baixas taxas de deformação*), uma deformação  $\varepsilon$  depende não somente da tensão  $\sigma$ , mas também do tempo e da temperatura.
- **Alta temperatura**
- Temperatura a partir da qual fenômenos difusivos (difusão, ascensão de discordâncias, etc...) começam a se manifestar macroscopicamente.
- *O limite entre “baixa temperatura” e “alta temperatura” varia de material para material.*

### Temperatura homóloga

$$t_H \equiv \frac{T}{T_F}$$

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

$$t_H > 0,4 \text{ ® Alta Temperatura}$$

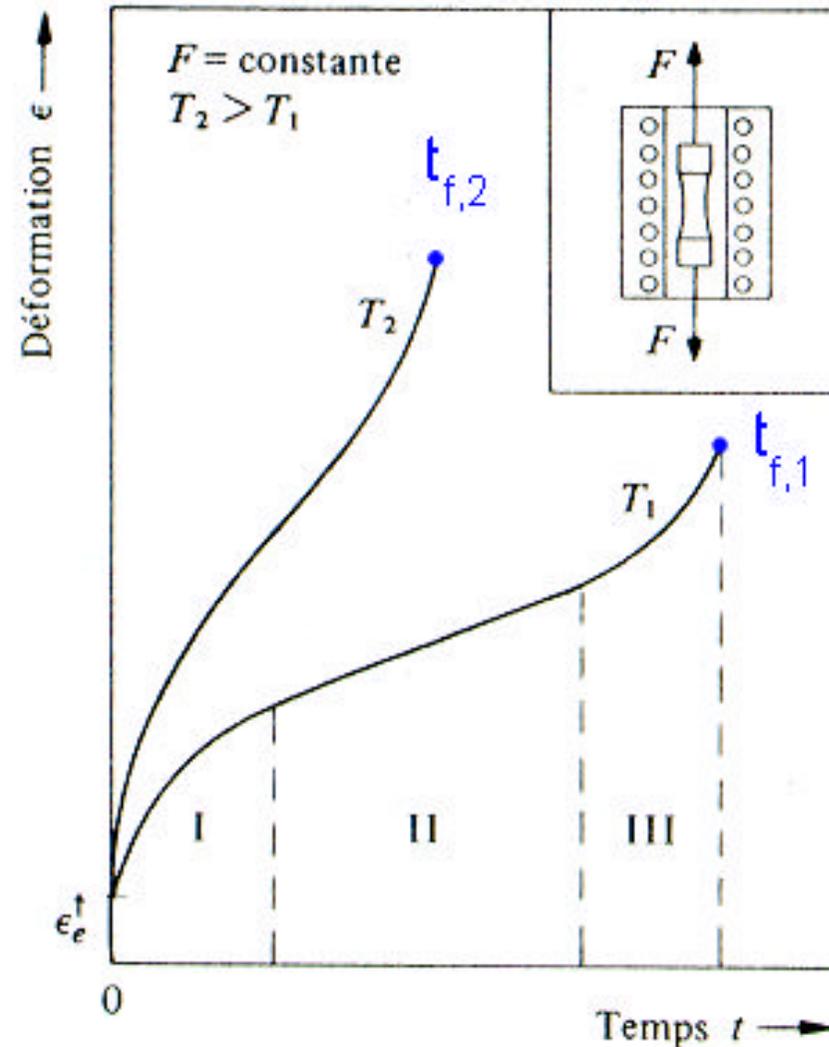
Limite entre basse et haute température pour différents matériaux.

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 <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2323			1162 (889)	
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	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)		

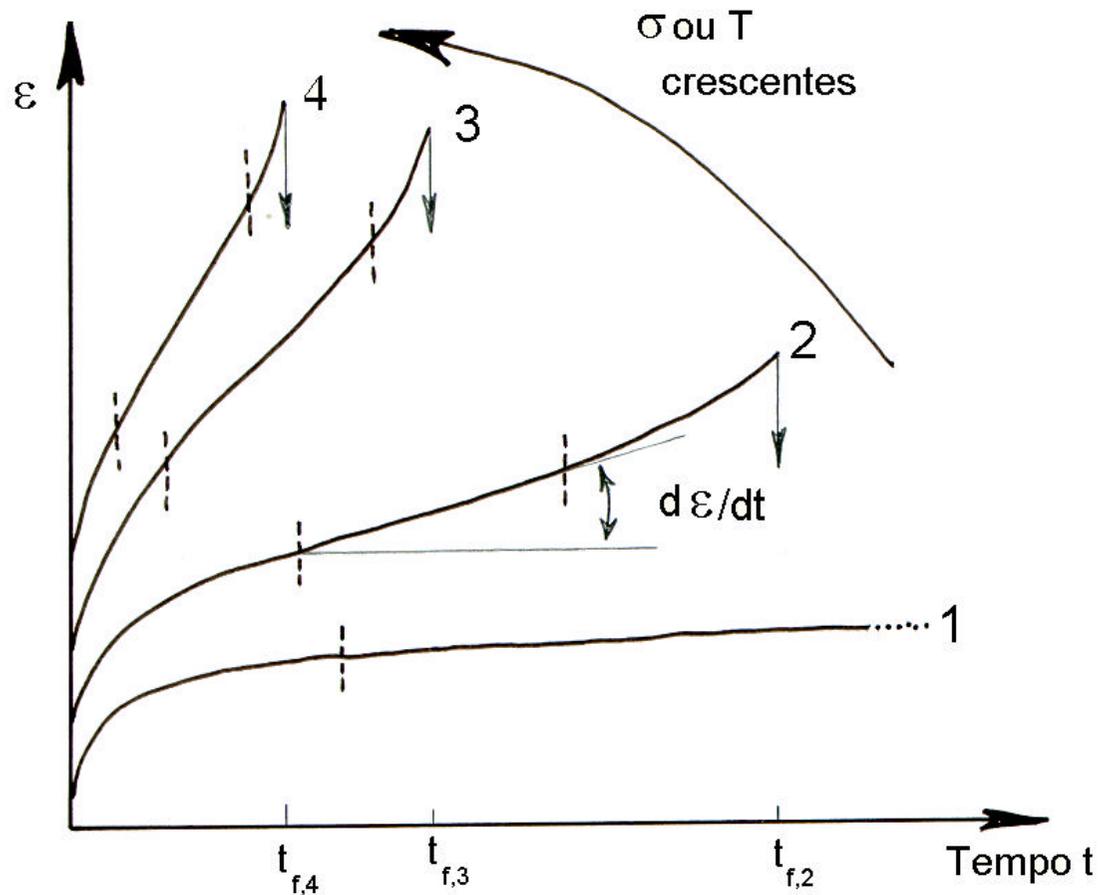
- Quando a temperatura é superior a  $0,4 T_F$ , os fenômenos difusivos tornam-se bastante significativos, e observam-se deformações plásticas em função do tempo, mesmo em tensões relativamente baixas. Esse é o fenômeno da **fluência**.
- A fluência é resultado de um comportamento visco-plástico dos metais.

## Curva de Fluência

- Estágio I ou transiente: taxa de deformação decrescente; encruamento
- Estágio II ou estacionário: taxa de deformação constante  $d\epsilon/dt$  é mínima; balanço entre encruamento e superação de obstáculos por processos difusivos (por exemplo, ascensão de discordâncias)
- Estágio III ou terciário: taxa de deformação crescente; desenvolvimento de cavidades (cavitação); *leva à ruptura do material*



# Efeito da temperatura e da tensão sobre a fluência



$$T_4 > T_3 > T_2 > T_1$$



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

e

$$\left(\frac{d\epsilon}{dt}\right)_1 < \left(\frac{d\epsilon}{dt}\right)_2 < \left(\frac{d\epsilon}{dt}\right)_3 < \left(\frac{d\epsilon}{dt}\right)_4$$

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



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

e

$$\left(\frac{d\epsilon}{dt}\right)_1 < \left(\frac{d\epsilon}{dt}\right)_2 < \left(\frac{d\epsilon}{dt}\right)_3 < \left(\frac{d\epsilon}{dt}\right)_4$$

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

## Outros fatores que afetam a fluência

- ✓ 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



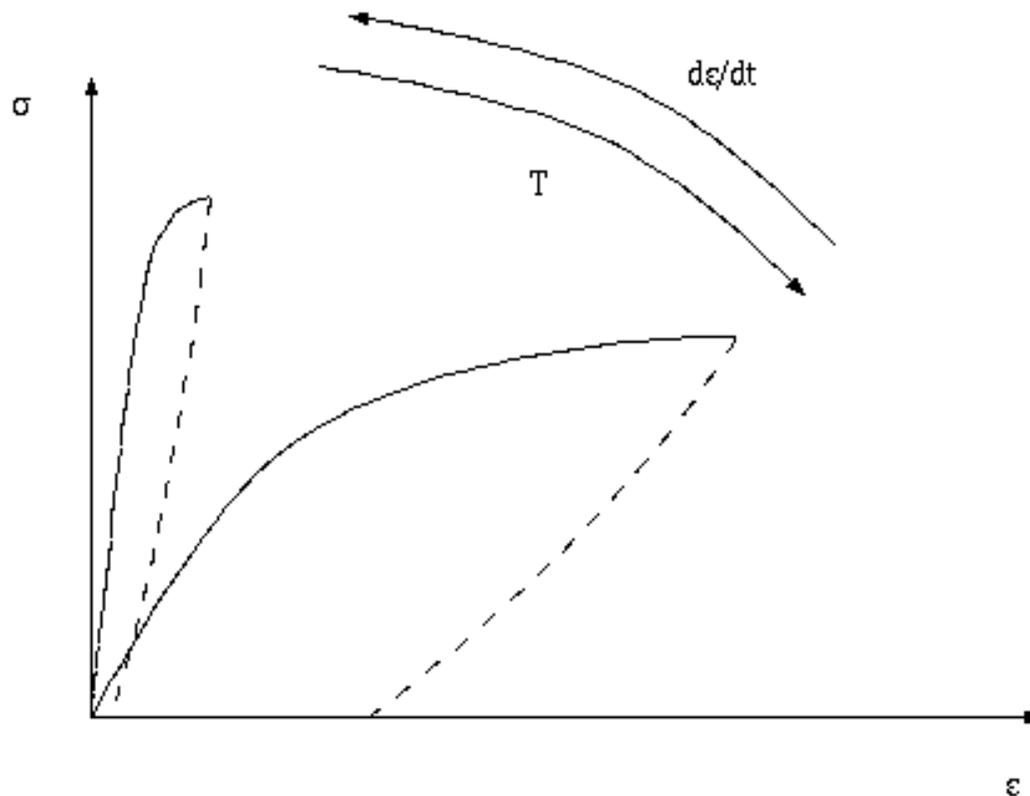
← Pá de turbina para aviões a jato com grãos orientados feita por solidificação direcional

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



## Temperatura x Taxa de Deformação

- *Temperatura* (“estimativa da energia cinética”)  $\Rightarrow$  vibrações da rede, rotação de macromoléculas, difusão etc...
- taxa de deformação  $\Rightarrow$  tempo necessário para que os processos ocorram.
- *Temperatura e taxa de deformação tem efeitos opostos sobre o comportamento mecânico.*
- *Exemplo: relação entre temperatura e taxa de deformação no comportamento mecânico de polímeros amorfos*



# Efeito da temperatura sobre a deformação plástica

14

- ✓  $T \uparrow \Rightarrow$  aumento da amplitude de vibração (dos átomos ou das macro-moléculas), rotação (macro-moléculas)  $\Rightarrow$  maior facilidade de movimentação das discordâncias / deslizamento no caso das macro-moléculas.

- ✓ Portanto:

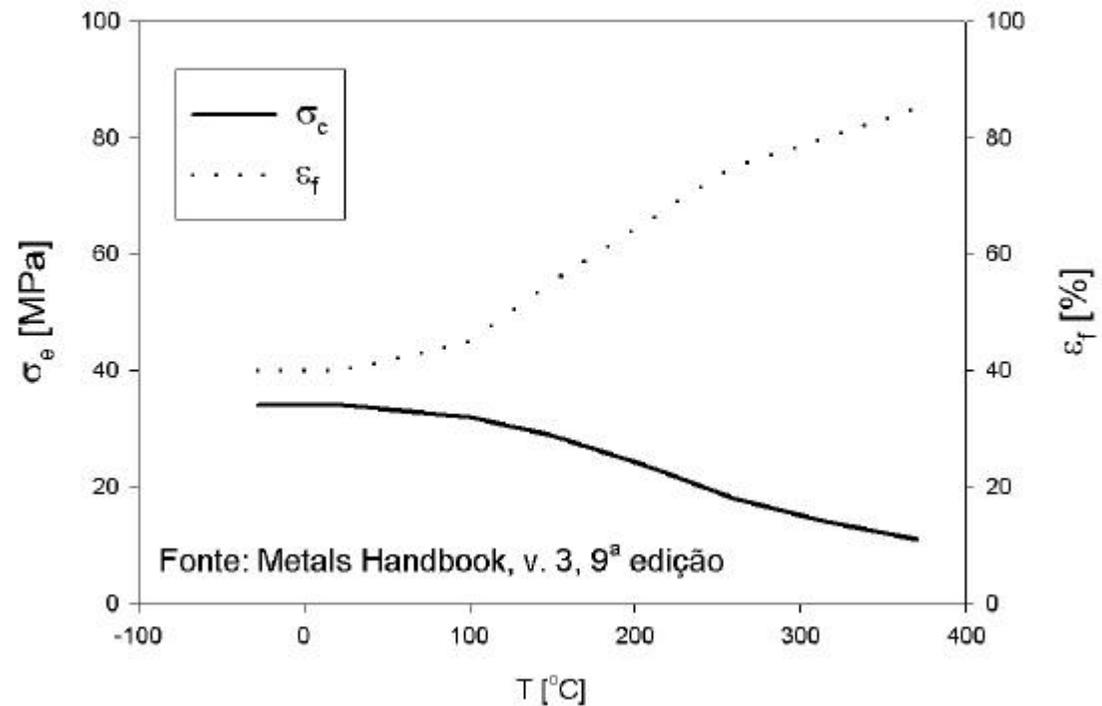
$T - \sigma_e - \epsilon_f$   
- **alongamento**

- ✓ *Aplicações* : conformação mecânica de materiais metálicos, poliméricos e cerâmicos (vidros).

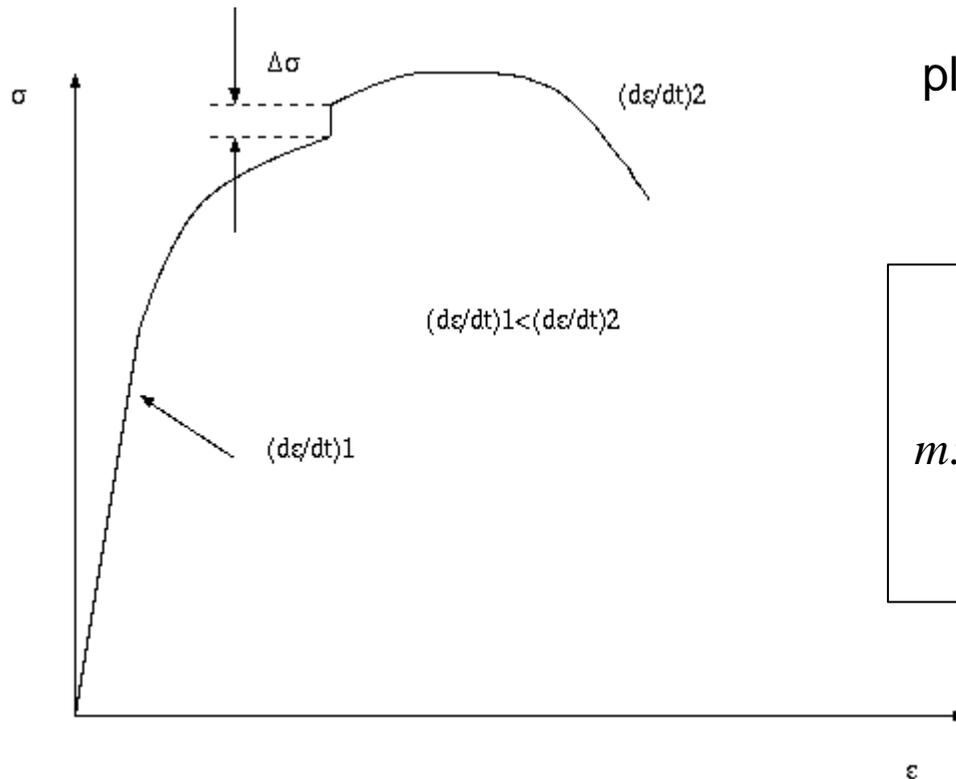
## Exemplo

Variação da tensão de escoamento ( $\sigma_e$ ) e do alongamento ( $\epsilon_f$ ) com a temperatura para alumínio AA1100

Alumínio AA1100 (min. 99% Al, 0,12% Cu)



# Efeito da taxa de deformação sobre o comportamento plástico



Os processos de deformação plástica requerem reorganização de átomos e/ou moléculas  $\Rightarrow$  dependem do tempo

$$\Delta S \propto (\Delta \dot{\epsilon})^m$$

$m$ : expoente de sensibilidade à taxa de deformação  
(strain-rate sensitivity)

Taxas de deformação muito elevadas (ou seja, deformações muito grandes em intervalos de tempo muito pequenos) são situações de solicitações severas para os materiais.

## Impacto

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

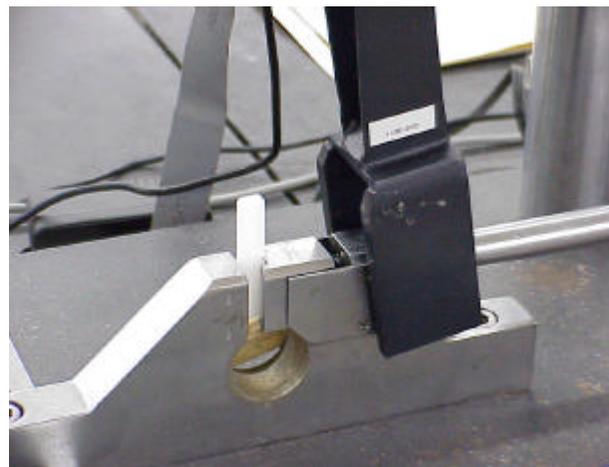
Solicitações de impacto:  $\approx 10^2 \sim 10^3 [s^{-1}]$

✓ Pêndulo de impacto (Ensaio Charpy e Izod)

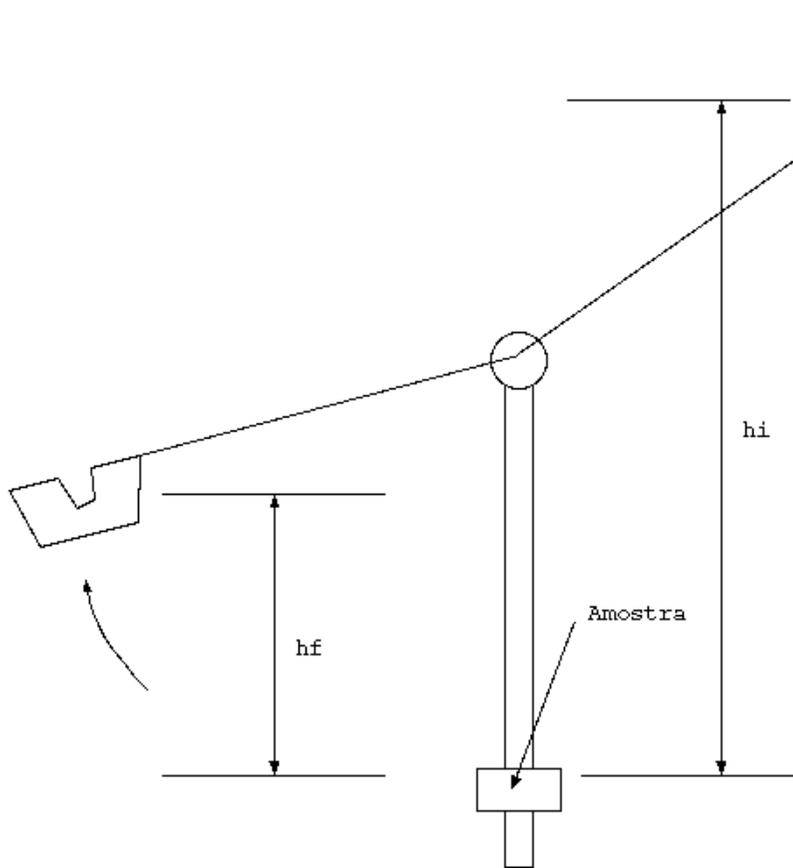
Pêndulo para metais,  
leitura analógica

Pêndulo para  
plásticos, leitura  
digital

Detalhe de um ensaio  
Izod: a amostra é fixada  
em um mandril

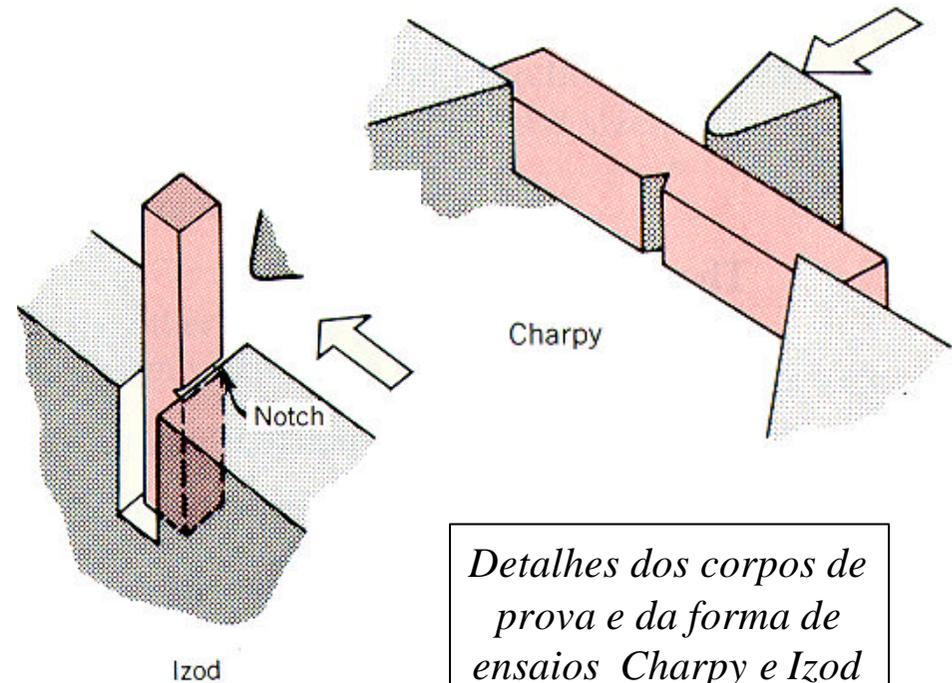
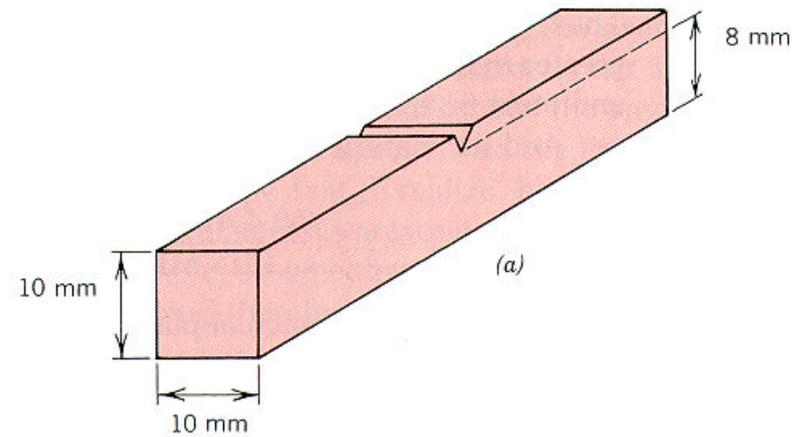


# Ensaio de impacto (Pêndulo)



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

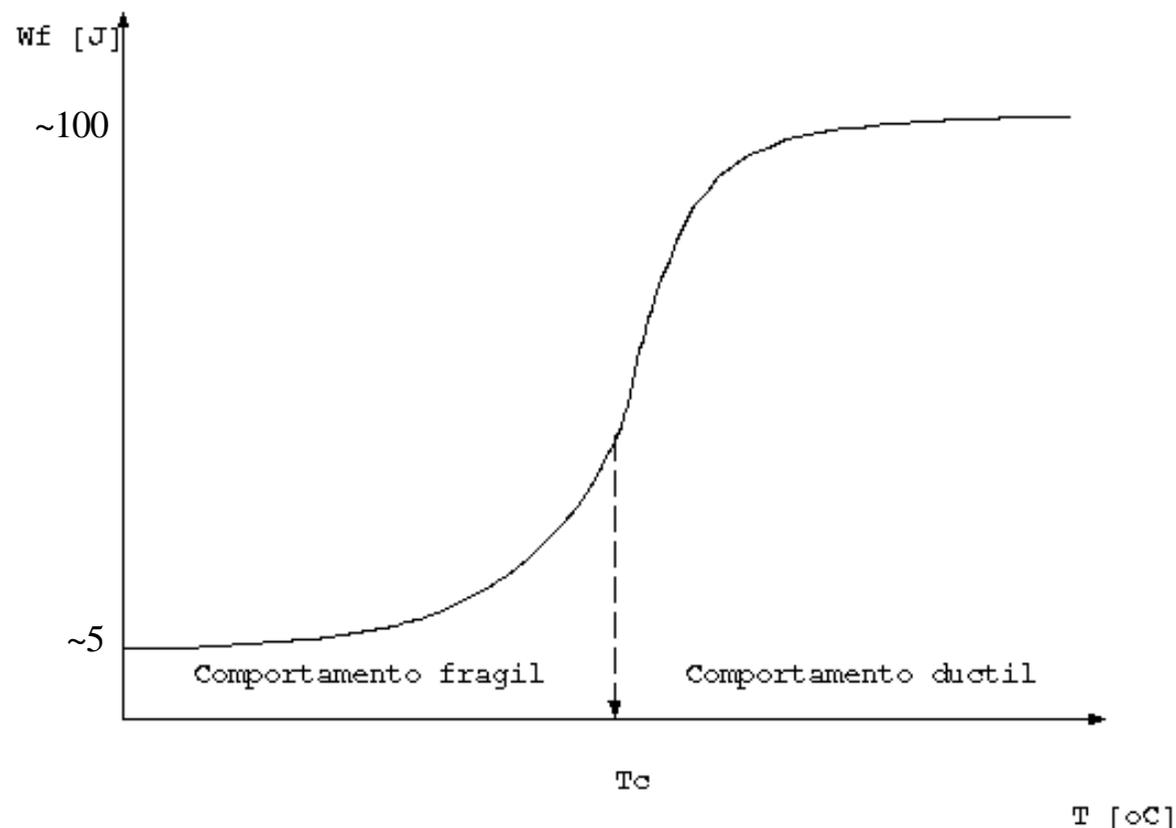
- $W_f$ : trabalho de fratura
- $m$ : massa do pêndulo
- $g$ : aceleração da gravidade
- $h_i$ : altura inicial do pêndulo
- $h_f$ : altura final do pêndulo



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

## Transição dúctil-frágil

### Medida do trabalho de fratura em função da temperatura



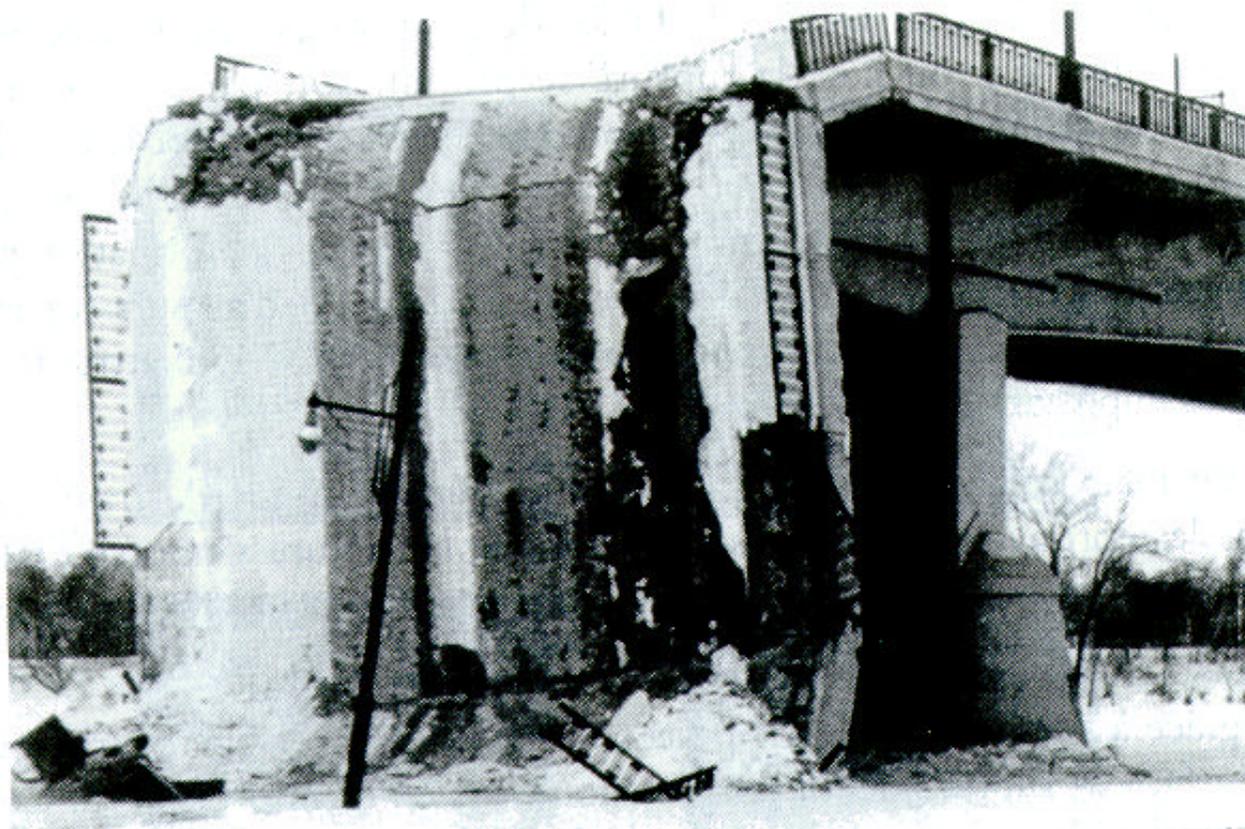
- Transição abrupta de um comportamento frágil, em baixa temperatura, para um comportamento dúctil, em alta temperatura.

- Depende fortemente da geometria da amostra e do critério para sua definição  $\Rightarrow$  cuidado em projeto para que um material não sofra essa transição em operação.

- Permite comparar, entretanto, a fragilidade ou ductilidade relativa em solicitações de impacto através de um ensaio padronizado.

- Pode ser observada em metais CCC e HC, polímeros e em cerâmicas (em temperaturas elevadas).

## Transição dúctil-frágil

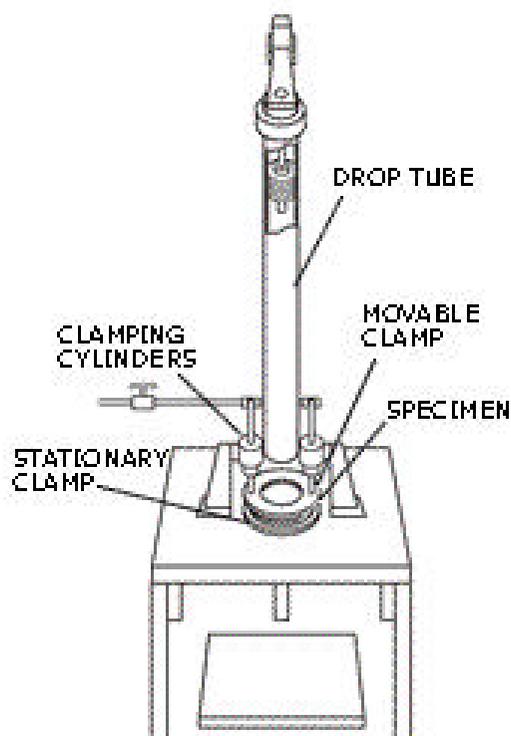


- Não se deve construir estruturas utilizando materiais que apresentem o comportamento de transição dúctil-frágil caso haja utilização em temperaturas abaixo da temperatura de transição  $T_c$ , para evitar fraturas frágeis e catastróficas.

*Ruptura de uma ponte metálica no Canadá, acontecida em 1951. A estrutura rompeu de forma frágil numa noite de inverno ( $-30^{\circ}\text{C}$ ), num momento em que a ponte não estava sequer submetida a uma grande solicitação.*

## Ensaio de impacto (ensaio de queda de peso)

### Ensaio de queda de peso (Drop-Weight Test)



✓ Um peso é lançado de uma altura pré-estabelecida em queda livre sobre a amostra.

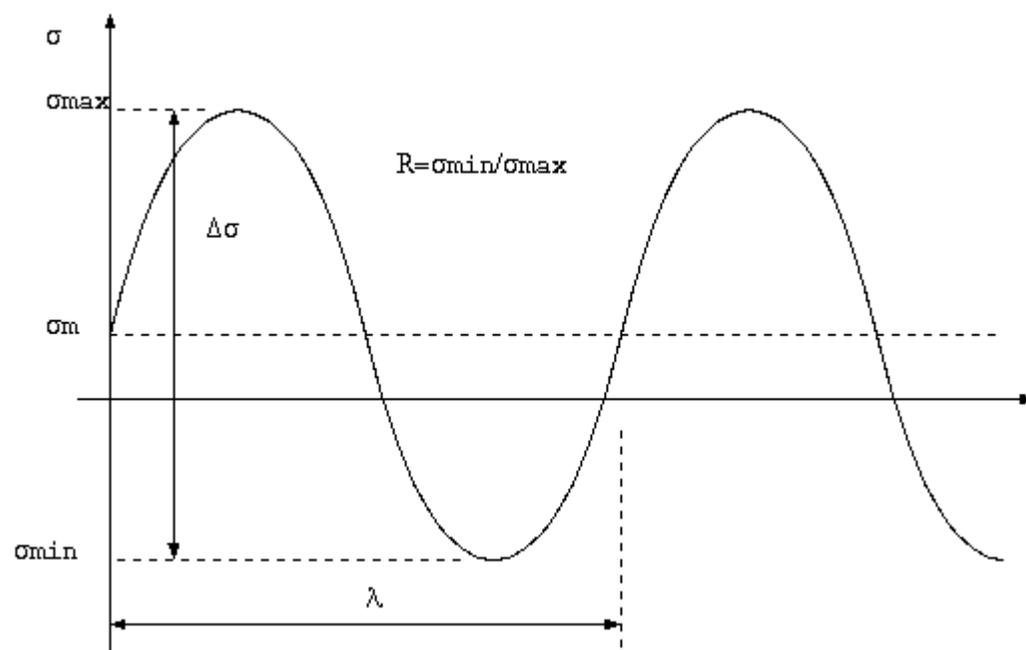
✓ O resultado é qualitativo  $\Rightarrow$  quebra ou não quebra (alternativamente, deforma ou não deforma, trinca ou não trinca,...)

✓ 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-ambientes

## Fadiga

- ✓ Até o momento, foram estudadas solicitações estáticas ou monotônicas (a força 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 ***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 mesmo quando um componente é 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)

# Parâmetros da solicitação cíclica



$\Delta\sigma$ : Amplitude de tensão

$\sigma_{\max}$ : Tensão máxima

$\sigma_{\min}$ : Tensão mínima

$\sigma_m$ : Tensão média

R: Razão de tensões

$\lambda$ : comprimento de onda

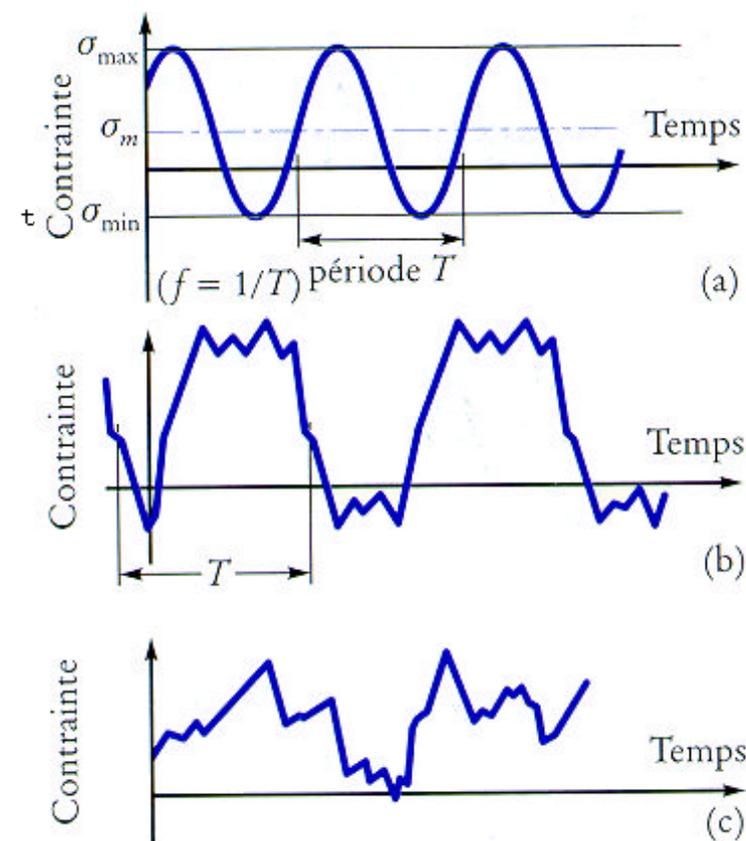
$N = \Delta t / \lambda$ : número de ciclos no intervalo de tempo  $\Delta t$

Tipos de Solicitação

(a) Senoidal

(b) Periódica

(c) Espectro (de tensões)



## Ensaio de fadiga

Máquina servo-hidráulica de ensaio de fadiga



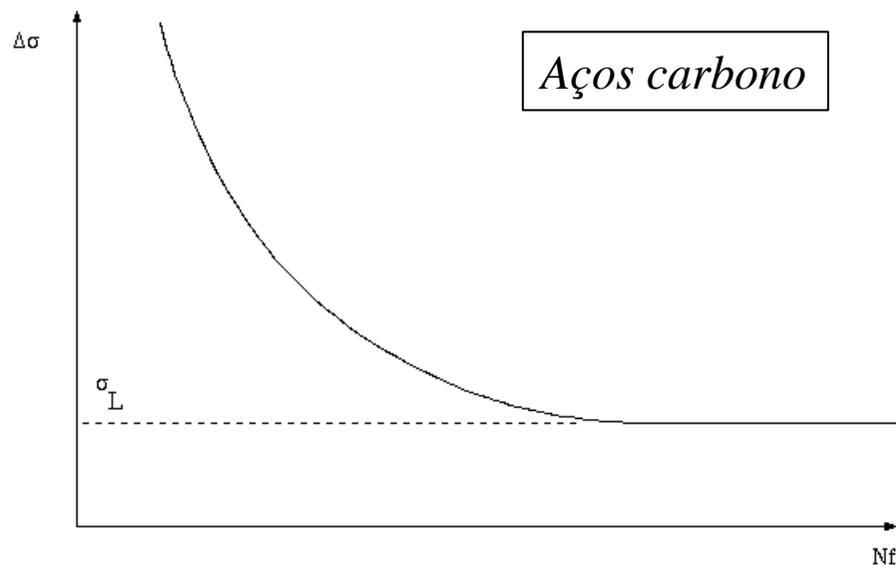
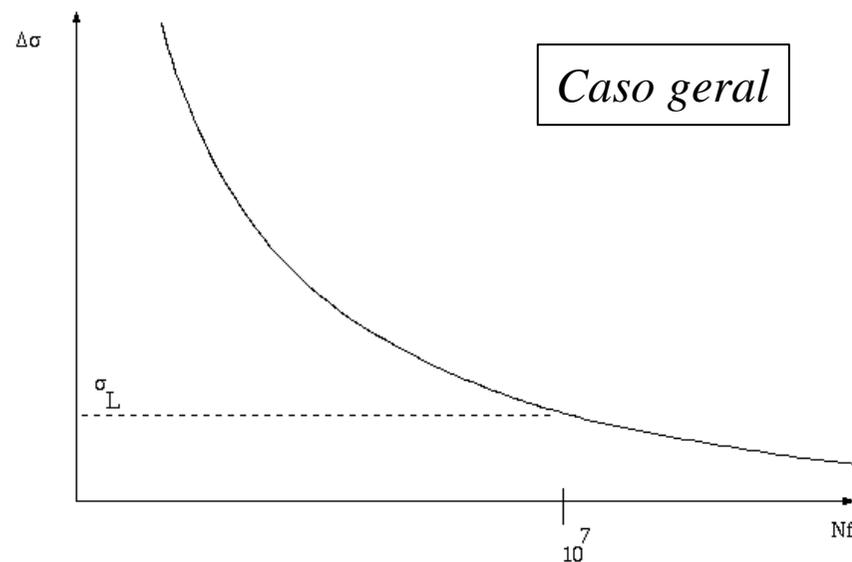
Corpos de prova antes e depois do ensaio



Ensaio de fadiga a quente em material resistente ao calor



## Curva S-N (curva de Wöhler)



- O ensaio é realizado em frequência constante e com um valor de R 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 ( $\sigma_L$ , *endurance limit*) como sendo o nível de amplitude de tensão abaixo do qual não se observa a ruptura por fadiga.
- Para aços-carbono 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.

- **Capítulo do Callister tratado nesta aula**
  - Comportamento visco-elástico : apenas iniciado na seção 16.7
  - Fluência : seção 8.13 a 8.15
  - Impacto : seção 8.6
  - Fadiga : seção 8.7 e 8.8
  
- Textos complementares indicados
  - Kurz, W.; Mercier, J.P.; Zambelli, G. – *Traité des Matériaux*. 1. Introduction à la Science des Matériaux. PPUR. Lausanne. 1991.
    - Deformação plástica e viscoelasticidade. Cap. 12. pgs 269-294.
  - Texto escrito pelo Prof. Cláudio Schoen (disponível no CoL)