



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Unidade 11

Propriedades Mecânicas III

Tempo e Temperatura

PMT 3100 - Fundamentos de Ciência e Engenharia dos Materiais
2º semestre de 2017

O que estudaremos nesta Unidade

- Na Unidade 9, analisamos o que ocorre ao longo de um *Ensaio de Tração* , no qual um corpo de prova é submetido, geralmente na *temperatura ambiente* (embora o ensaio de tração possa ser realizado em qualquer temperatura...) :
 - seja a uma deformação que aumenta a uma taxa constante (O ENSAIO MAIS COMUM) ;
 - seja a uma carga aplicada que aumenta a uma taxa constante (atualmente muito raramente realizado...).
- Nesta Unidade, vamos estudar o efeito do **tempo** e da **temperatura** no comportamento mecânico dos materiais :
- Efeito do tempo e da temperatura no comportamento mecânico dos materiais → **FLUÊNCIA**
- Comportamento Elástico e Viscoelástico
 - Modelando *VISCOELASTICIDADE*
 - Relaxação de Tensão
- Efeito da taxa de deformação sobre o comportamento mecânico → **IMPACTO**
 - Comportamento Dúctil-Frágil
- *Também é importante estudar o comportamento de materiais quando submetidos a esforços cíclicos* → **FADIGA** (...MAS ESSE TEMA NÃO SERÁ TRATADO NESTA UNIDADE...)

Fluência (*"CREEP"*)



FLUÊNCIA (“Creep”)

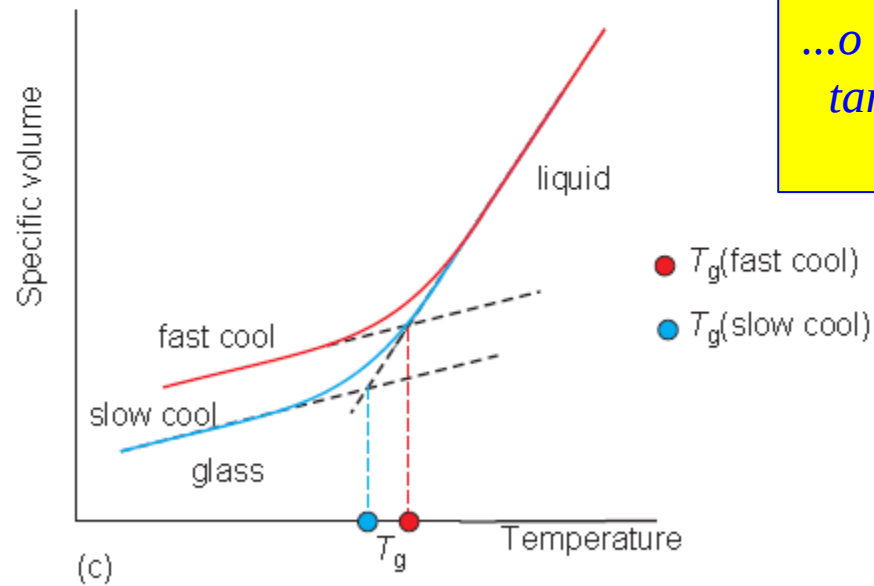
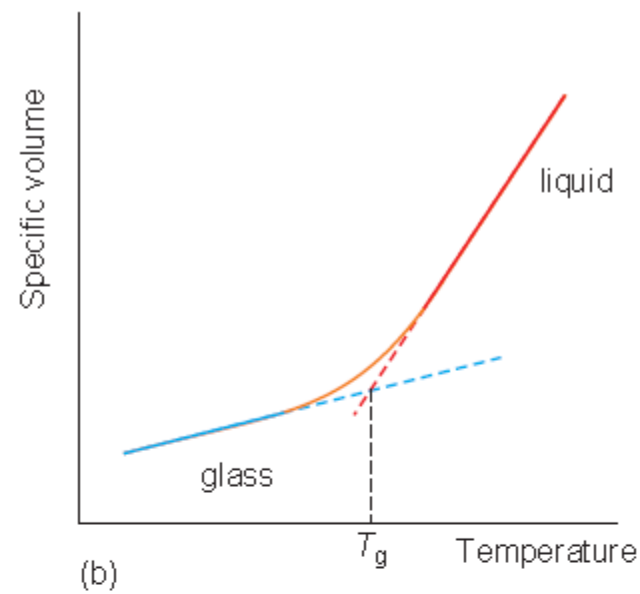
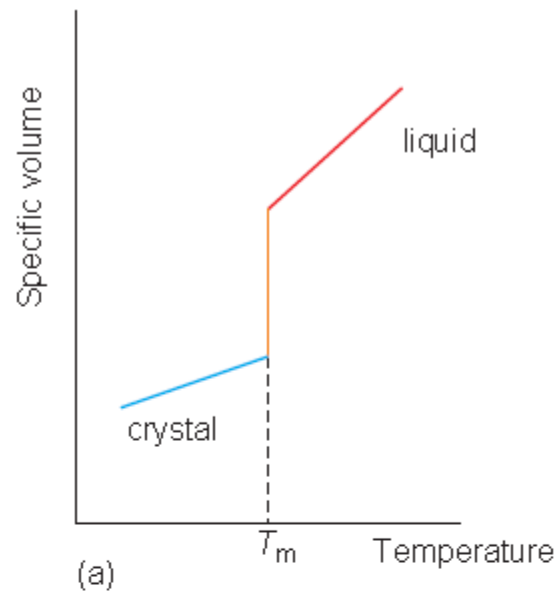
- Na Unidade 9, analisamos o que ocorre ao longo de um *ENSAIO DE TRAÇÃO*. No Ensaio de Tração, um corpo de prova é submetido, usualmente na temperatura ambiente:
 - *seja a uma carga aplicada que aumenta a uma taxa constante,*
 - *seja a uma deformação que aumenta a uma taxa constante.*
- Nesta Unidade, inicialmente vamos observar os efeitos do tempo e da temperatura, ou seja, vamos ver o que ocorre em relação à *DEFORMAÇÃO* quando um corpo é submetido a uma *CARGA CONSTANTE* por um *TEMPO LONGO* e frequentemente em temperaturas superiores à ambiente → essas condições caracterizam o fenômeno de **FLUÊNCIA**.

FLUÊNCIA (“Creep”)

- Definiremos **FLUÊNCIA** como sendo um processo de deformação permanente que pode ocorrer em todos os materiais quando submetidos a uma tensão constante por um tempo suficientemente longo.
- A temperatura influencia de forma marcante a fluência.
- Em *metais* e em *cerâmicas*, a fluência começa a ser significativa quando os materiais são submetidos a tensões em temperaturas geralmente superiores a 40% da temperatura de fusão.
- Em *polímeros*, o fenômeno de fluência começa a tornar-se significativo quando os materiais são submetidos a tensões em temperaturas próximas da temperatura de *transição vítrea*.

Transição vítrea : esse conceito ainda não foi apresentado no curso, e será discutido em detalhe na Unidade que trata das Propriedades de Materiais Poliméricos (Unidade 12). No momento, basta esta definição: A temperatura de transição vítrea (T_g) é a temperatura em que se iniciam as rotações livres internas na cadeia polimérica.

- O fenômeno de *fluência* acarreta deformações permanentes (ou seja, *deformações plásticas*).
 - Quando a tensão é removida, o material que sofreu deformação por fluência geralmente apresenta uma recuperação elástica, mas como sofreu deformação plástica não retorna às suas dimensões originais.

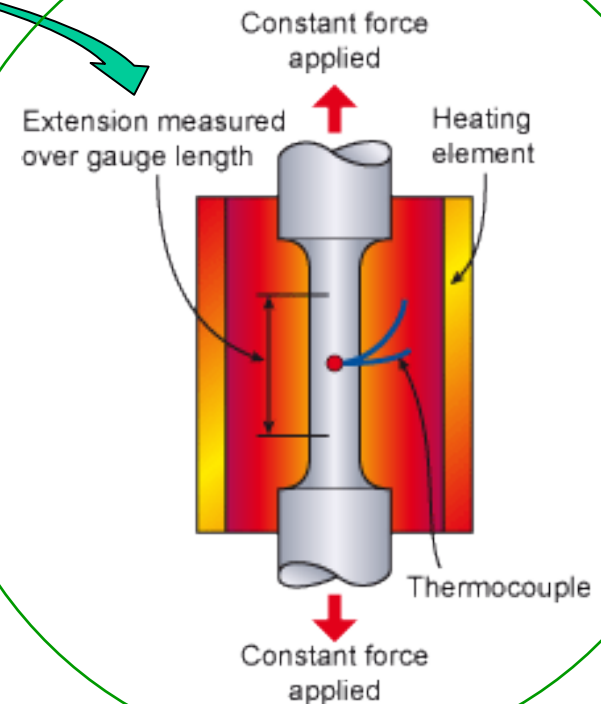


*...o termo **Temperatura de Transição Vítrea** também pode ser relacionado a materiais cerâmicos (**vidros**) ...*

Specific volume versus temperature curves: (a) a crystalline solid, with melting point T_m ; (b) a glass, with glass transition temperature T_g ; (c) the effects of cooling rate on glass transition temperature.

FLUÊNCIA

- O material é submetido a uma carga (*que corresponde a uma tensão...*) menor do que a carga correspondente à tensão de escoamento.
- A **carga** é mantida **constante** e avalia-se a **deformação** resultante em função do tempo.
- Ensaios nos quais a TENSÃO é mantida constante são possíveis, mas são muito caros, pois a carga teria que ser constantemente reduzida para dar conta da diminuição da seção transversal do corpo de prova (*se o ensaio for de fluência em tração*) devido à sua deformação ao longo do ensaio.
 - A rigor, um ensaio de fluência deveria ser realizado em tensão constante...



Creep

creep

Materials are often placed in service at elevated temperatures and exposed to static mechanical stresses (e.g., turbine rotors in jet engines and steam generators that experience centrifugal stresses, and high-pressure steam lines). Deformation under such circumstances is termed **creep**. Defined as the time-dependent and permanent deformation of materials when subjected to a constant load or stress, creep is normally an undesirable phenomenon and is often the limiting factor in the lifetime of a part. It is observed in all materials types; for metals it becomes important only for temperatures greater than about $0.4T_m$ (T_m = absolute melting temperature). Amorphous polymers, which include plastics and rubbers, are especially sensitive to creep deformation.

Callister, W.D. Materials Science and Engineering: An Introduction. 7th Ed. Wiley. 2007. Cap.8

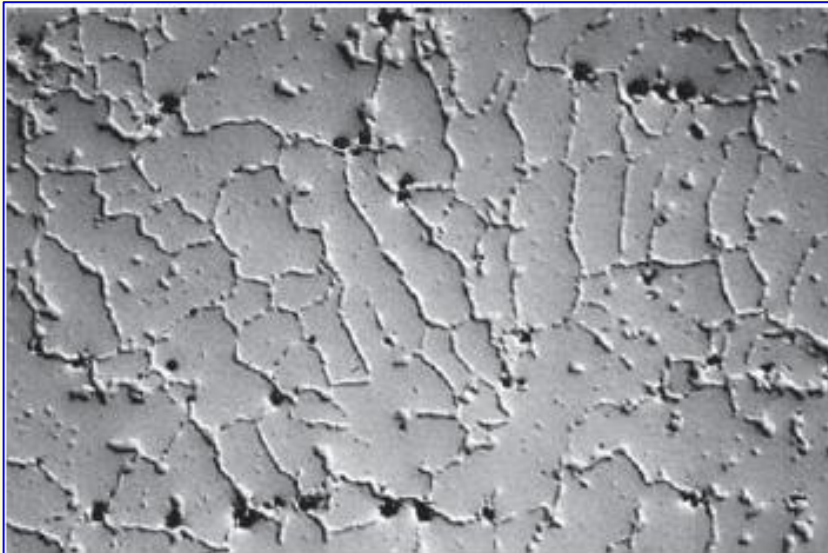


Figure 4. Cavities from creep forming at the grain boundaries.
Cr-Ni Alloy. MOP.

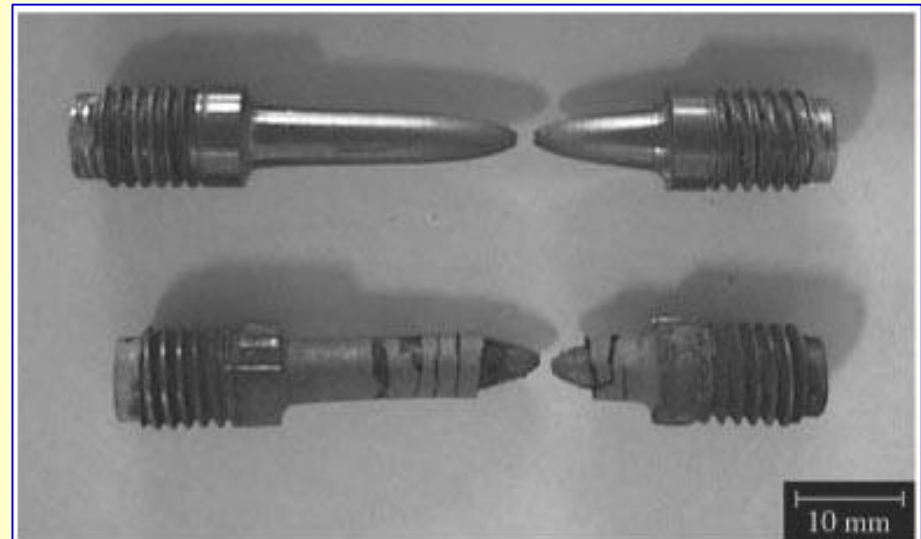


Figure 12. Typical aspect of the specimens after creep testing at 700 °C and 51.7 MPa. On top: in vacuum, rupture time = 162.7 hours; at the bottom: in air, rupture time = 51.1 hours.

Efeito da TEMPERATURA na FLUÊNCIA

- Em **baixas temperaturas** (e baixas taxas de deformação), uma deformação ϵ praticamente só depende da tensão σ .
- Em **altas temperaturas** (e baixas taxas de deformação), uma deformação ϵ depende não somente da tensão σ , mas também do tempo e da temperatura.
- *O limite entre "baixa temperatura" e "alta temperatura" varia de material para material.*

Temperatura Homóloga (τ_H)

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

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

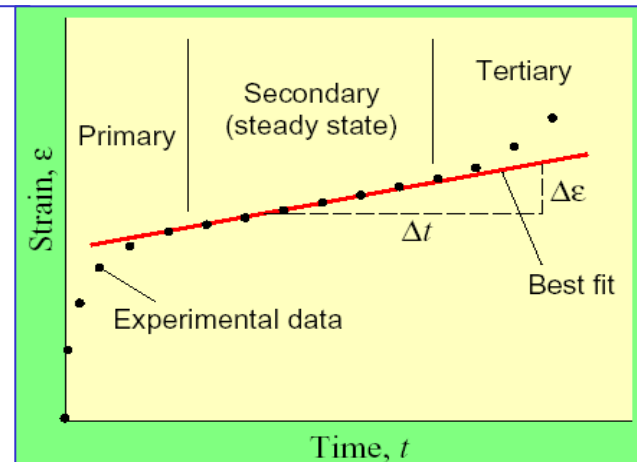
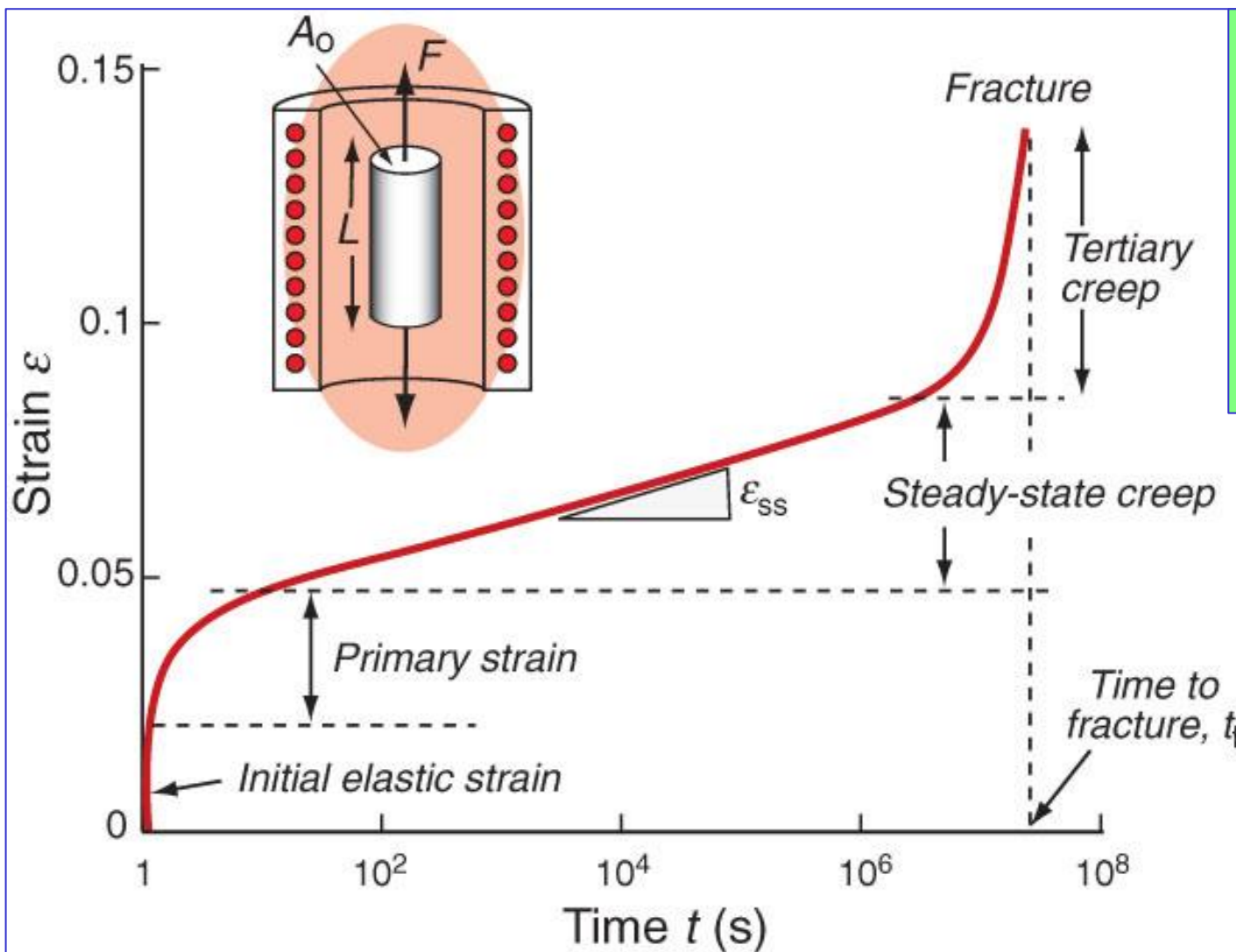
para metais: $\tau_H > 0,4 \rightarrow$ Alta Temperatura

Efeito da TEMPERATURA na FLUÊNCIA

Limite entre basse et haute température pour différents matériaux.

Matériaux			Métaux	Céramiques	Polymères
	T_m K	T_g K	$0,4 T_m$ 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)		

Curva de Fluência



CURVA DE FLUÊNCIA TÍPICA PARA MATERIAIS METÁLICOS OU CERÂMICOS

O material testado é mantido em uma temperatura fixa e submetido a uma carga constante → avalia-se a deformação resultante em função do tempo.

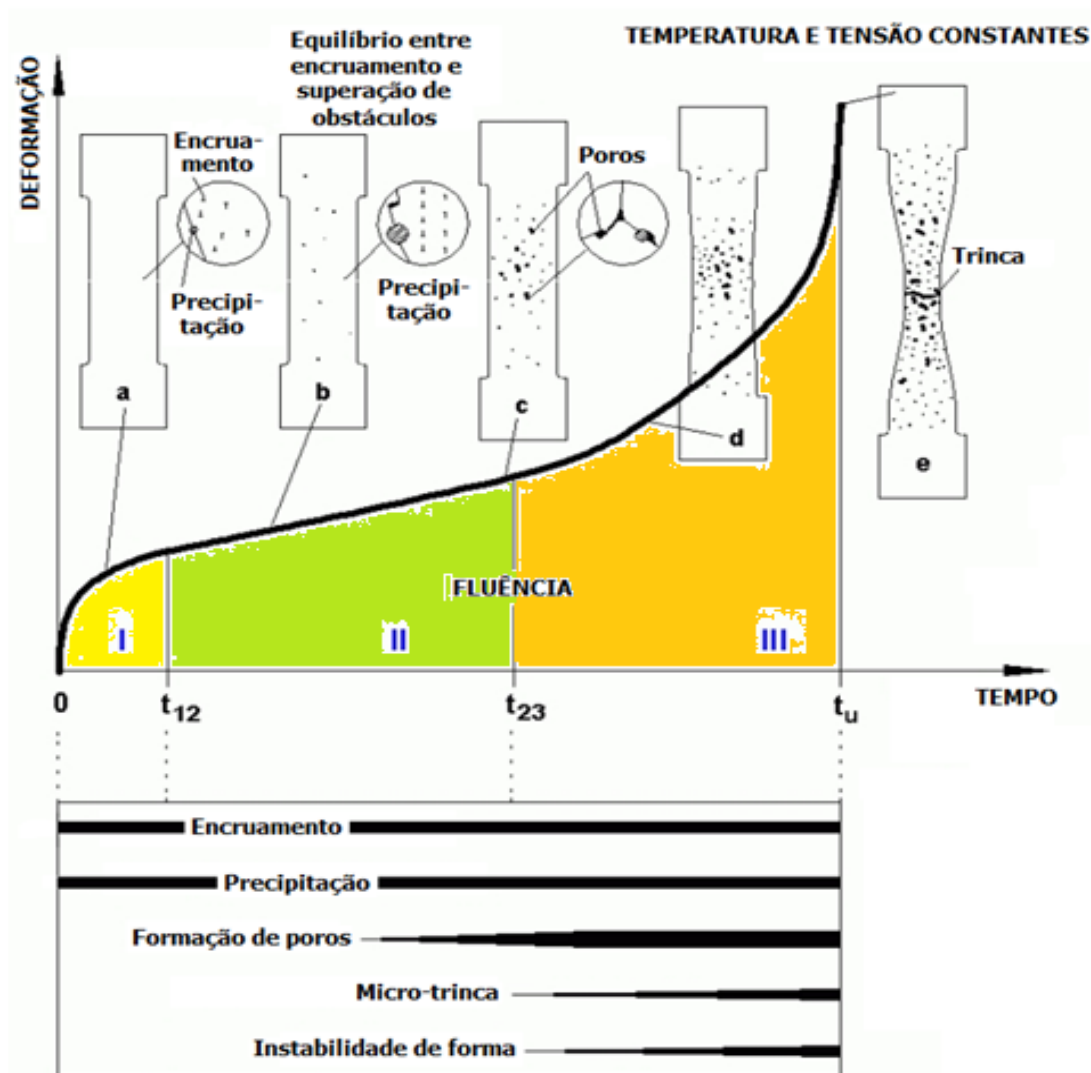
Materiais metálicos são normalmente ensaiados sob esforços de tração, e cerâmicos sob esforços de compressão.

Interpretação da Curva de Fluência em Metais

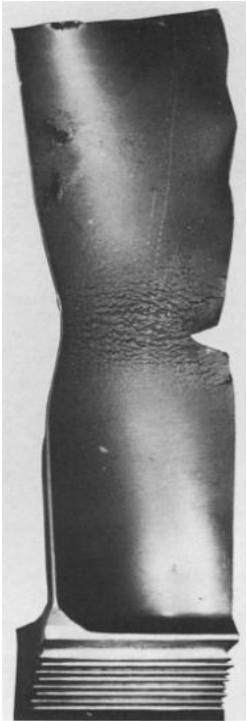
- Quando a temperatura é superior a $0,4 T_F$, os fenômenos difusivos tornam-se bastante significativos nos metais, e observam-se deformações plásticas em função do tempo, mesmo em tensões relativamente baixas. Esse é o fenômeno da **FLUÊNCIA**.

CURVA DE FLUÊNCIA

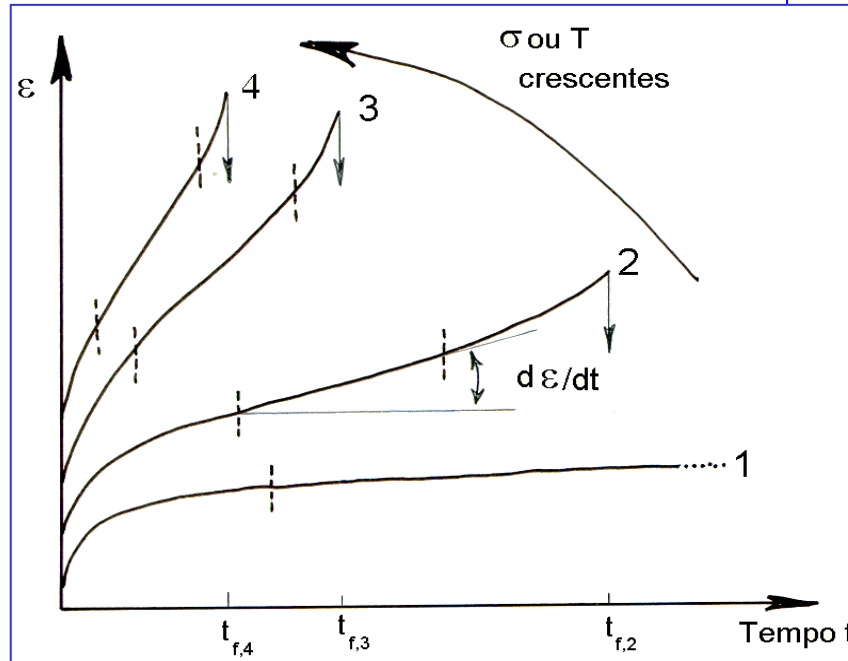
- Estágio I** ou **TRANSIENTE**: taxa de deformação $d\varepsilon/dt$ **decrecente**; efeito do encruamento.
 - Estágio II** ou **ESTACIONÁRIO**: taxa de deformação $d\varepsilon/dt$ (**constante**) é mínima; equilíbrio entre o encruamento e a superação de obstáculos por processos difusivos (por exemplo,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



METAIS – Efeito da Temperatura e da Tensão sobre a Fluência



Falha por fluência de uma paleta de turbina de avião



(a)

Falha por fluência de uma tubulação

$$T_4 > T_3 > T_2 > T_1$$



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

e

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

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



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

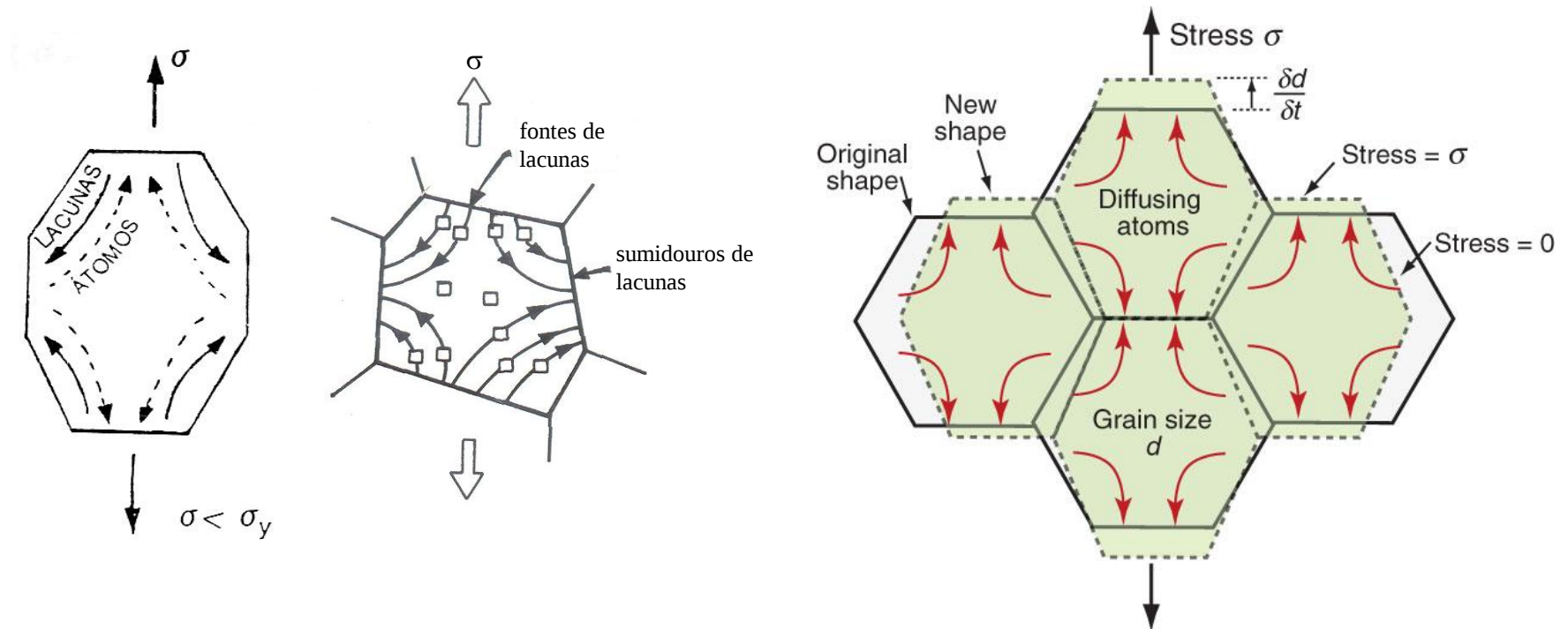
e

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

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

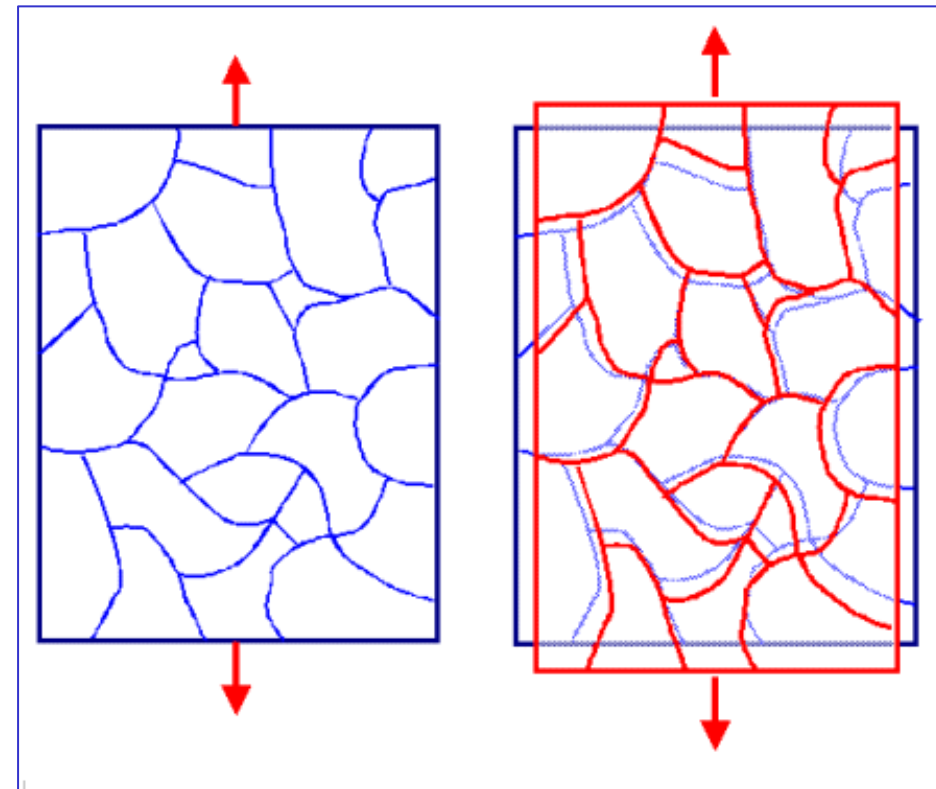
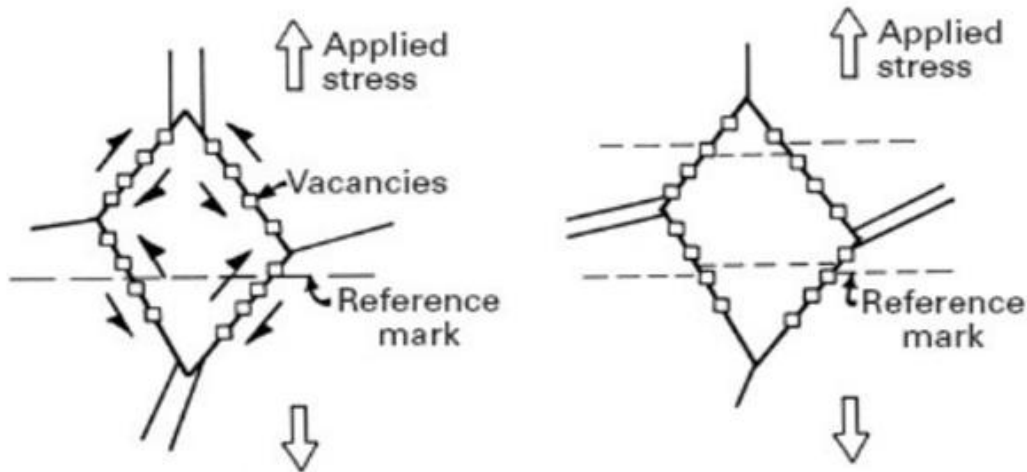
Mecanismos de Fluência – Difusão

- **Mecanismo de Nabarro-Herring** → **Difusão** no interior do grão ("*bulk diffusion*")
 - Movimento de lacunas de forma a produzir um aumento do comprimento dos grãos ao longo da direção de aplicação de tensões de tração. Assim, as lacunas se movem do topo e da base para as regiões laterais do grão. Os contornos perpendiculares à direção de aplicação da tensão de tração são distendidos e funcionam como fontes de lacunas. Os contornos paralelos à direção de aplicação de tensão de tração funcionam como sumidouros de lacunas. A variação do comprimento do grão é proporcional ao fluxo de lacunas.
 - A velocidade de deformação por fluência diminui com o aumento do tamanho dos grãos.



Mecanismos de Fluência – Difusão

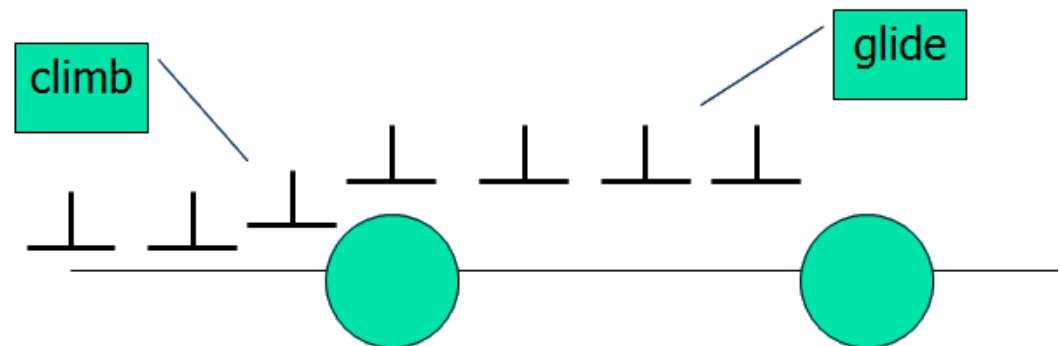
- **Mecanismo de Coble** → **Difusão** nos contornos dos grãos (*"grain boundary diffusion"*)
 - A difusão ocorre nos **contornos de grão** ao invés de ocorrer no volume do grão.
 - Esse processo de difusão resulta em escorregamento de contornos, o que possibilita, também, alongamento de grãos na direção da aplicação da tensão de tração.



Mecanismos de Fluência – Discordâncias

- Mecanismos envolvendo **movimento de discordâncias** (*“Dislocation Glide”* – *“Dislocation Climb”*)
 - **Ambos são mecanismos termicamente ativados**
 - *“Dislocation Glide”* (*“Escorregamento”*) – envolve a movimentação de discordâncias ao longo dos planos de deslizamento → mecanismo que não necessita de temperaturas elevadas.
 - *“Dislocation Climb”* – envolve a movimentação de discordâncias associada à movimentação de lacunas ou à difusão de átomos intersticiais → como requer difusão, é favorecido por temperaturas elevadas.

- Dislocation climb=dislocations absorb or emit point defects
- Dislocation glide=dislocation motion by pure slip



Mecanismos de Fluência – Cerâmicas e Polímeros

- Em **cerâmicas cristalinas**, outros mecanismos diferentes dos mencionados até aqui são mais importantes. Exemplos :
 - **Escorregamento de contornos de grão** → é comum a existência de materiais não-cristalinos ou vítreos nos contornos de grão. A energia de ativação necessária para deformar essas fases vítreas é menor do que a necessária para deformar os grãos, e materiais cerâmicos com a presença de fases vítreas apresentam maior fluência do que materiais completamente cristalinos.
 - Nucleação de microtrincas.
- Os **mecanismos de fluência em polímeros** serão discutidos a seguir, quando for tratado o tema “Viscoelasticidade”.

Fatores que afetam a Fluência em Metais

18

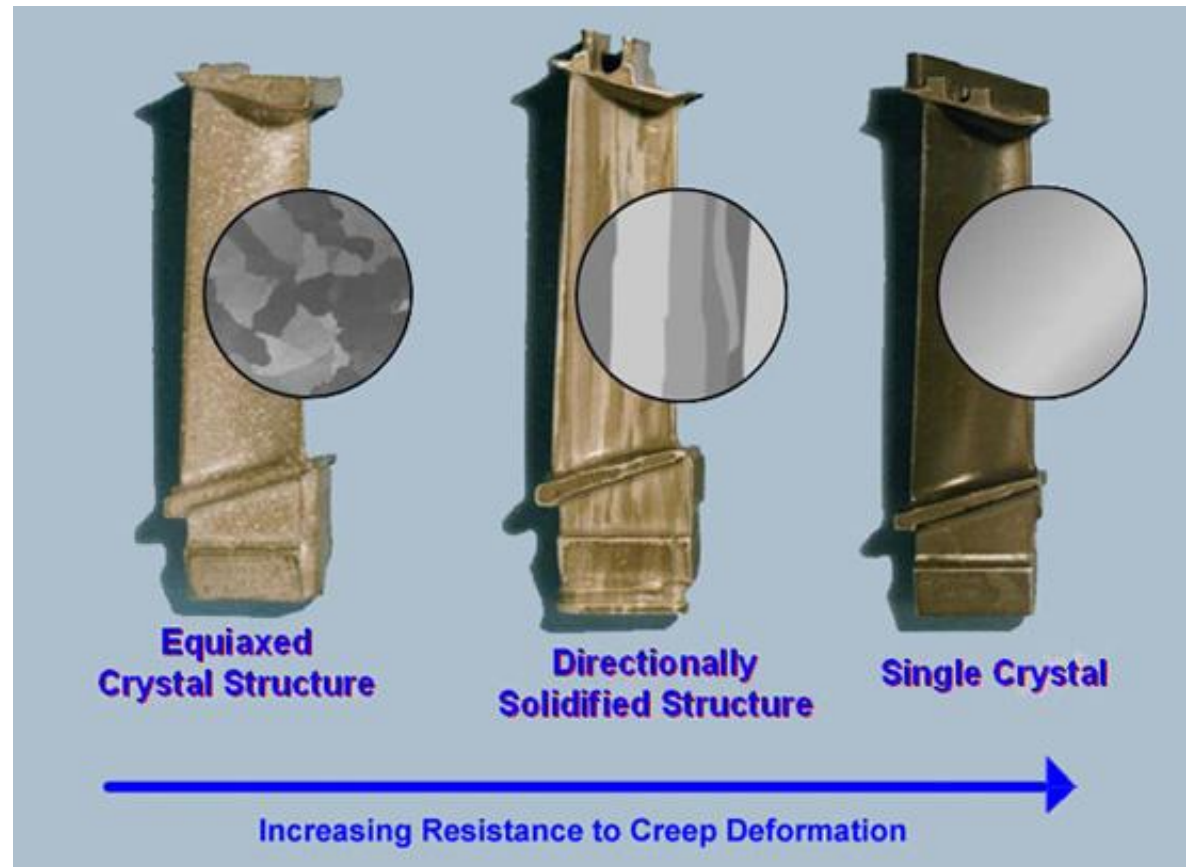
- ✓ Estrutura cristalina :
 $\nearrow$ complexidade $\Rightarrow$ $\nearrow$ resistência à fluência
- ✓ Precipitados :
 $\nearrow$ fração de precipitados $\Rightarrow$ $\nearrow$ resistência à fluência
- ✓ Contornos de grão :
 $\nearrow$ tamanho de grão $\Rightarrow$ $\nearrow$ resistência à fluência



← 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

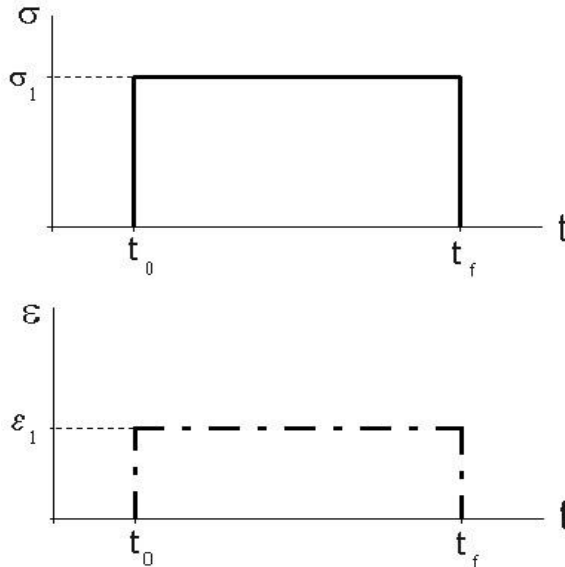
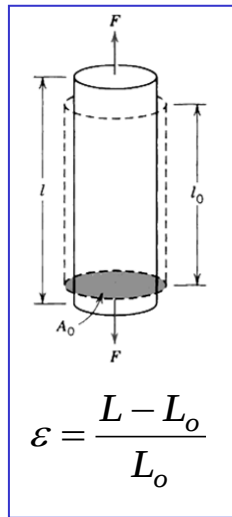


Fonte: https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/creep/other_metals.php

A large, spherical ball of tangled rubber bands in various colors including red, blue, yellow, and green. The bands are stretched and intertwined, creating a complex, fibrous structure. A white rectangular box with a blue border is superimposed on the right side of the ball, containing the word "Viscoelasticidade" in blue text.

Viscoelasticidade

Comportamento Elástico (**sólido** hookiano)

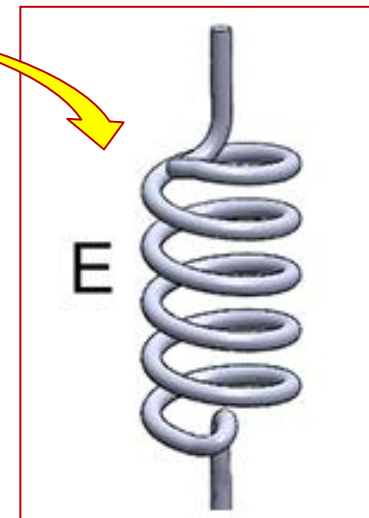


$$\sigma_1 = E \cdot \epsilon_1$$

E = módulo de elasticidade [Pa]

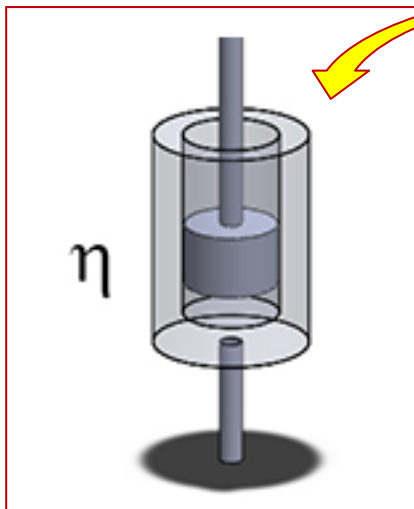
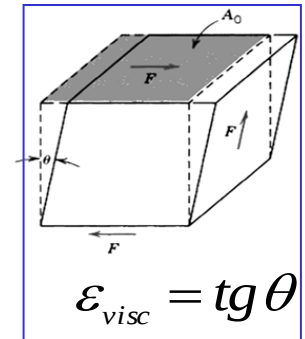
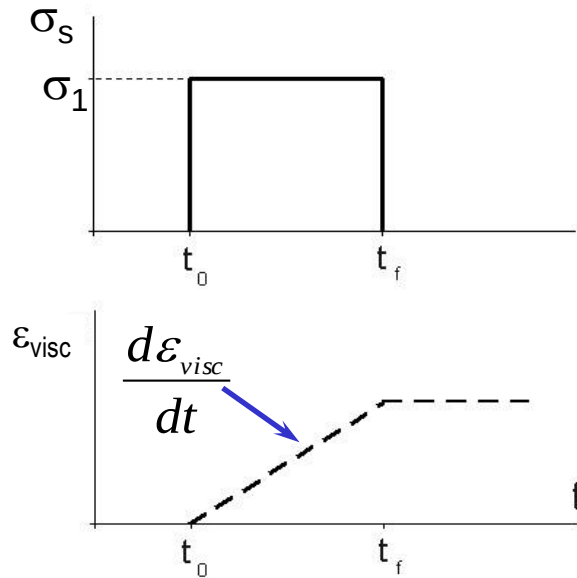
Processo reversível $\Rightarrow$ não dissipa energia!

- Para deformações relativamente pequenas e temperaturas baixas (*no caso de polímeros, abaixo da T_g*), ou para solicitações de curta duração $\rightarrow$ o comportamento mecânico dos sólidos normalmente é **ELÁSTICO**.
- A deformação elástica é **independente do tempo** $\rightarrow$ ela ocorre no instante em que a tensão é aplicada ou relaxada.
- O processo é **reversível** $\rightarrow$ não ocorre dissipação de energia.



Comportamento **Viscoso** (*líquido* newtoniano)

- A contraposição ao comportamento elástico é o comportamento **VISCOSO**.
- O comportamento completamente viscoso é **dependente do tempo** → a deformação começa a ocorrer no instante em que a tensão é aplicada mas não é instantânea, continuando a aumentar enquanto a tensão permanecer.
- O processo é **irreversível** → ocorre dissipação de energia.

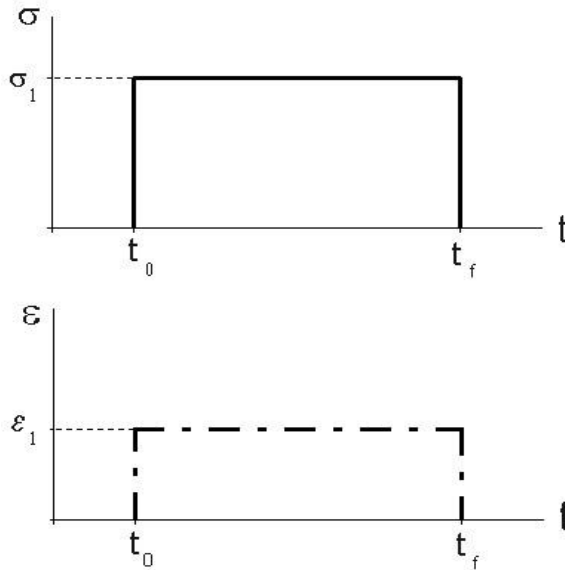
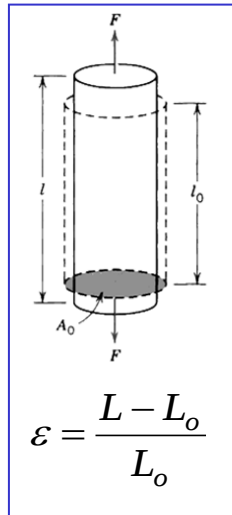


$$\sigma_s = \eta \cdot \frac{d\varepsilon_{visc}}{dt}$$

η = viscosidade [Pa.s]

Processo irreversível ⇒
dissipa energia!

Comportamento **Elástico** (**sólido** hookiano)

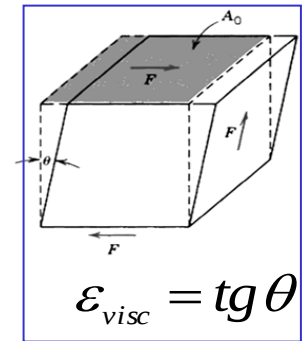
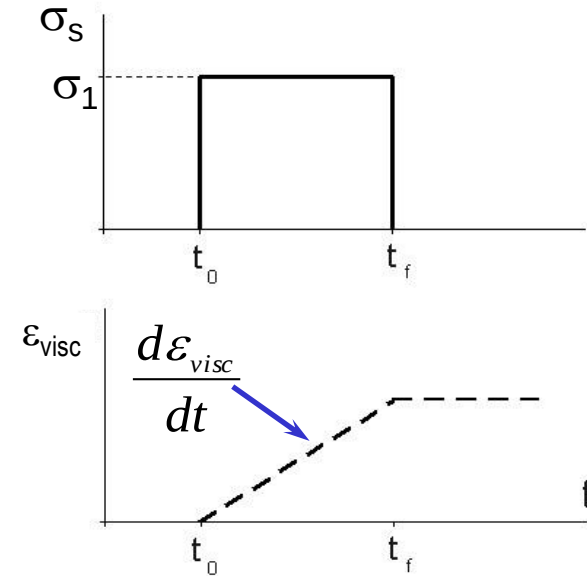


$$\sigma_1 = E \cdot \epsilon_1$$

E = módulo de elasticidade [Pa]

Processo reversível $\Rightarrow$ não
dissipa energia!

Comportamento **Viscoso** (**líquido** newtoniano)

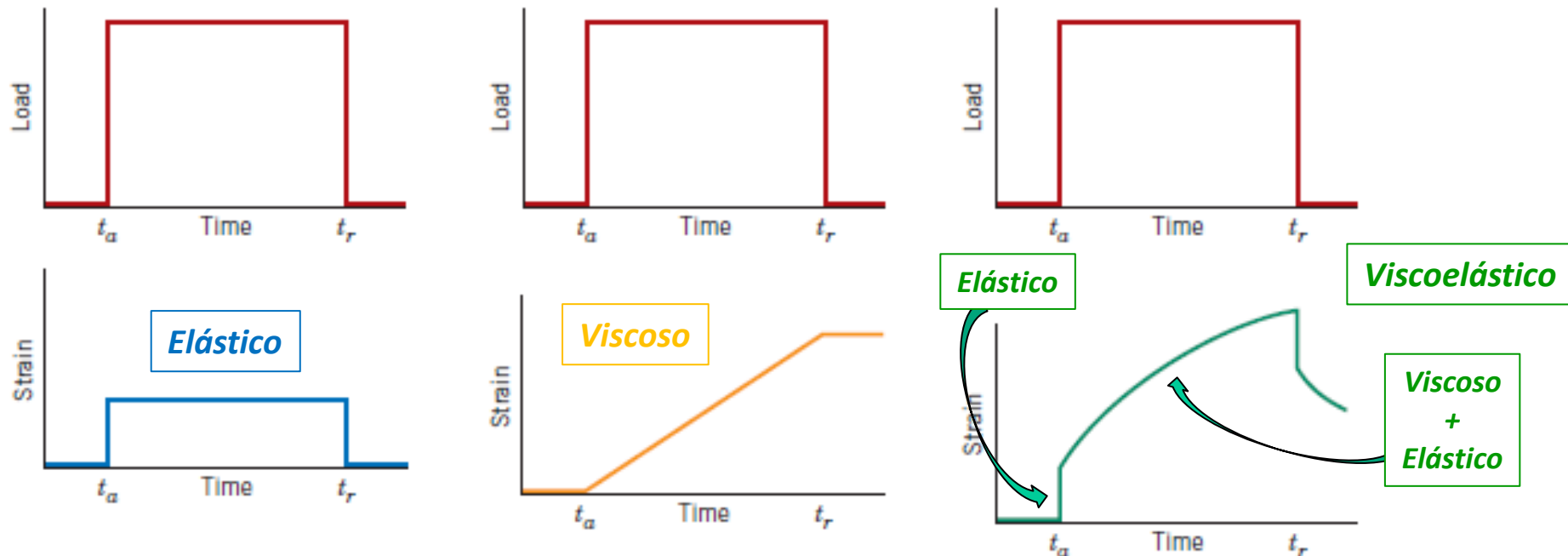


$$\sigma_s = \eta \cdot \frac{d\epsilon_{visc}}{dt}$$

η = viscosidade [Pa.s]

Processo irreversível $\Rightarrow$
dissipa energia!

- O comportamento VISCOELÁSTICO é intermediário entre o puramente elástico e o puramente viscoso.
- Quando uma tensão é aplicada, o resultado é uma deformação elástica, que é seguida por uma deformação de caráter [elástico + viscoso] (dependente do tempo), que não é totalmente recuperada quando a tensão é relaxada.
- O comportamento viscoelástico é bastante comum em materiais poliméricos.
- O comportamento viscoelástico dos materiais poliméricos depende do tempo, da temperatura e da taxa de deformação.



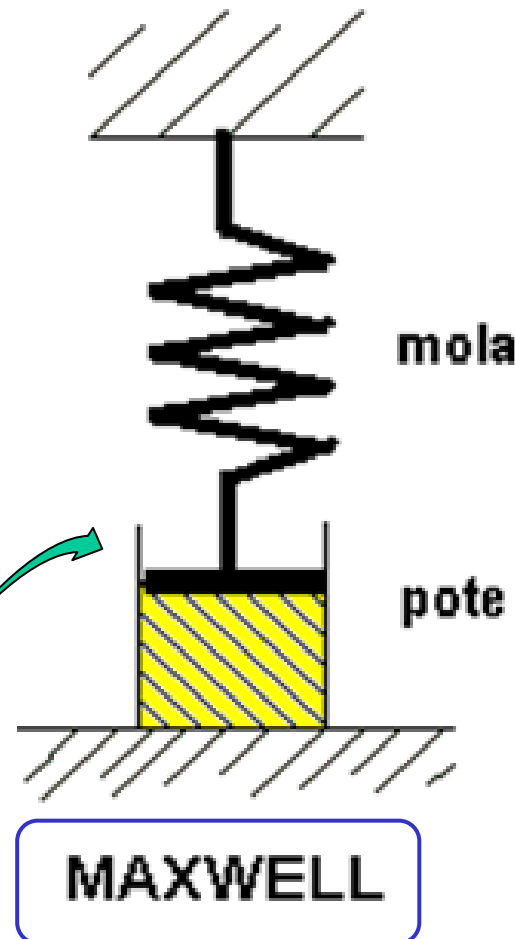
Métodos para Avaliar o Comportamento Viscoelástico

Relaxação de tensão

(“*Stress Relaxation*”)

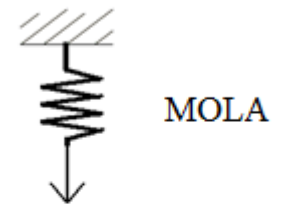
- O material é **deformado**.
- A deformação é mantida constante e avalia-se a **tensão** resultante **em função do tempo**.

...duas unidades em série



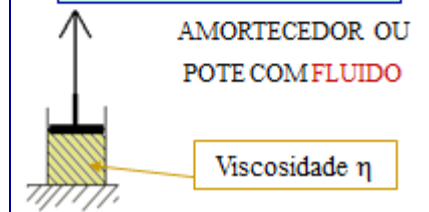
• Sólido “Hookiano”

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



• Líquido Newtoniano

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



Modelo de Maxwell – RELAXAÇÃO DE TENSÃO

Aplica-se uma *deformação* ε_0 , numa dada *temperatura*, e observa-se $\sigma = f(t)$

E e η são
sensíveis à
temperatura

$$\sigma(t) = \sigma_0 e^{\left[-\frac{t.E}{\eta}\right]}$$

$$\sigma(t) = \sigma_0 e^{\left(-\frac{t}{\tau}\right)}$$

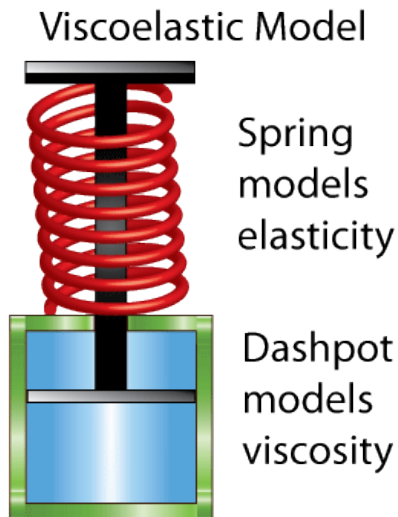
$$\tau = \text{tempo de relaxação} = \frac{\eta}{E}$$

Módulo de Relaxação E_r (para $\varepsilon_0 = cte$)

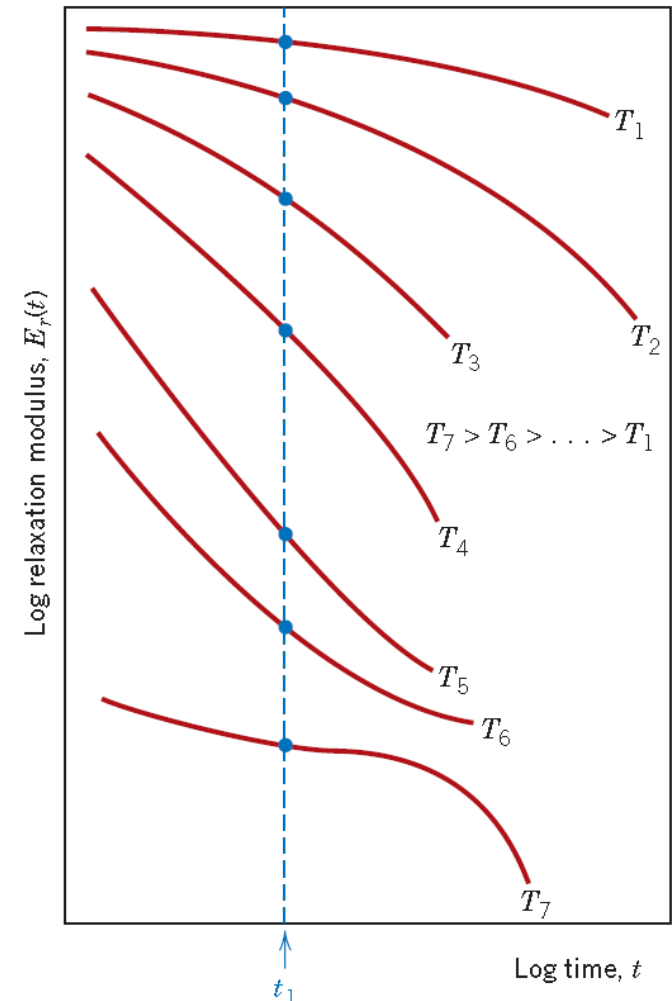
$$E_r(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0}$$

$E_r(t)$ e $\sigma(t)$ *diminuem* com
o *tempo* em cada *temperatura*.

Aumentando a *temperatura* $\rightarrow$ o
tempo de relaxação τ é *menor*,
e $E_r(t)$ e $\sigma(t)$ são *menores*.



Representação Esquemática
do Módulo de Relaxação
em função do Tempo e da Temperatura



Viscoelastic Relaxation Modulus

The viscoelastic behavior of polymeric materials is dependent on both time and temperature; several experimental techniques may be used to measure and quantify this behavior. *Stress relaxation* measurements represent one possibility. With these tests, a specimen is initially strained rapidly in tension to a predetermined and relatively low strain level. The stress necessary to maintain this strain is measured as a function of time, while temperature is held constant. Stress is found to decrease with time because of molecular relaxation processes that take place within the polymer. We may define a **relaxation modulus** $E_r(t)$, a time-dependent elastic modulus for viscoelastic polymers, as

$$E_r(t) = \frac{\sigma(t)}{\epsilon_0}$$

Relaxation modulus—ratio of time-dependent stress and constant strain value

where $\sigma(t)$ is the measured time-dependent stress and ϵ_0 is the strain level, which is maintained constant.

Furthermore, the magnitude of the relaxation modulus is a function of temperature; to more fully characterize the viscoelastic behavior of a polymer, isothermal stress relaxation measurements must be conducted over a range of temperatures.

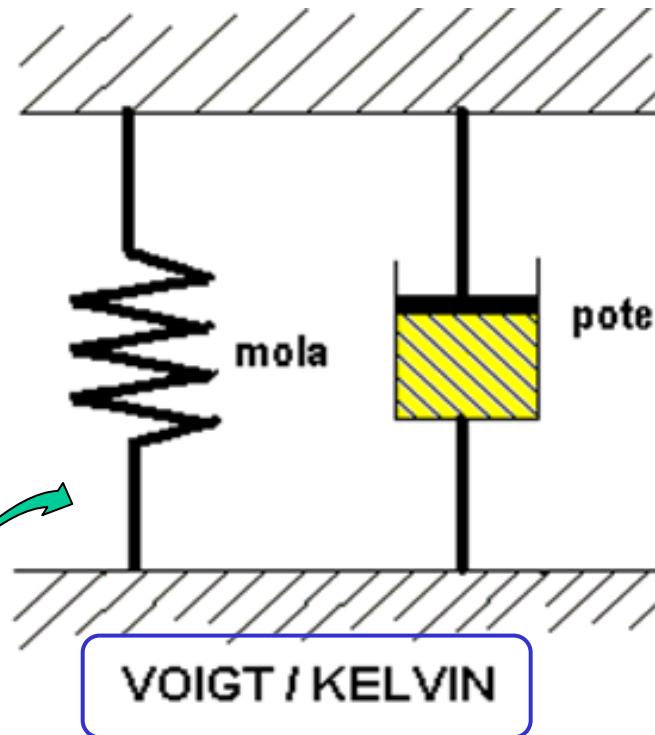
Métodos para Avaliar o Comportamento Viscoelástico

Fluência

("Creep")

- O material é submetido a uma tensão.
- A tensão é mantida constante e avalia-se a deformação resultante em função do tempo.

...duas unidades em paralelo



• Sólido "Hookiano"

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



MOLA

• Líquido Newtoniano

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



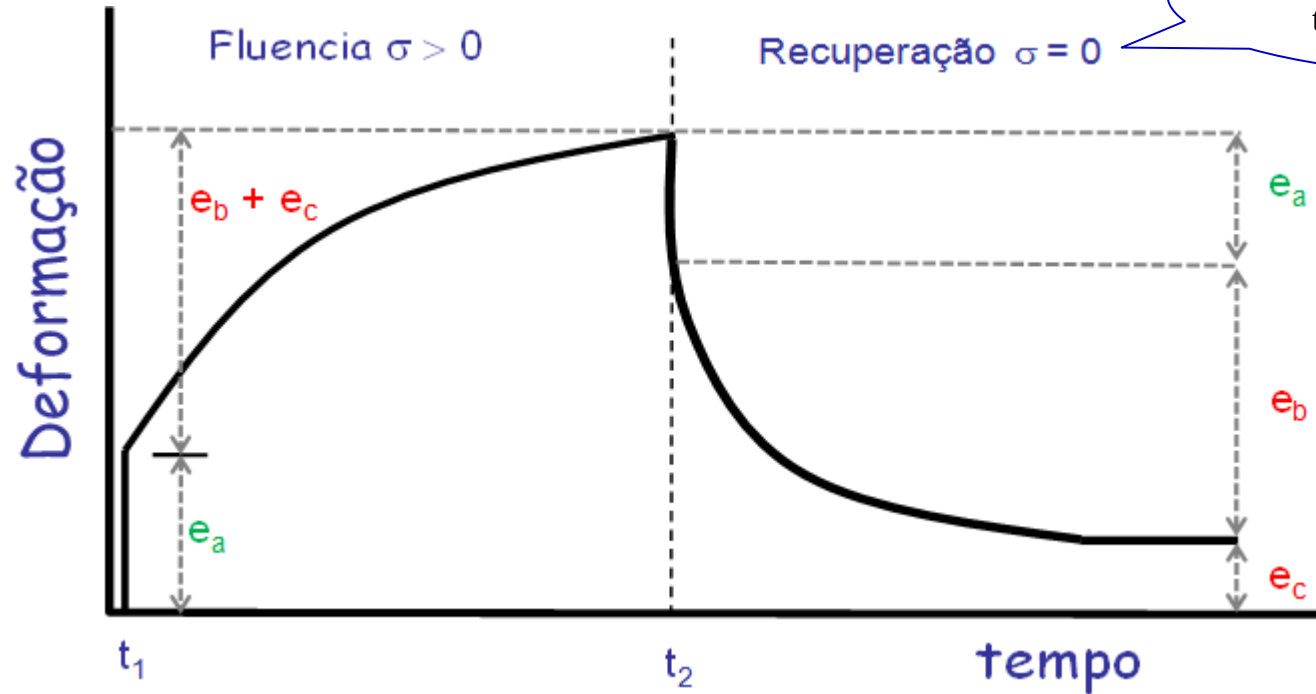
AMORTECEDOR OU
POTE COM FLUIDO

Viscosidade η

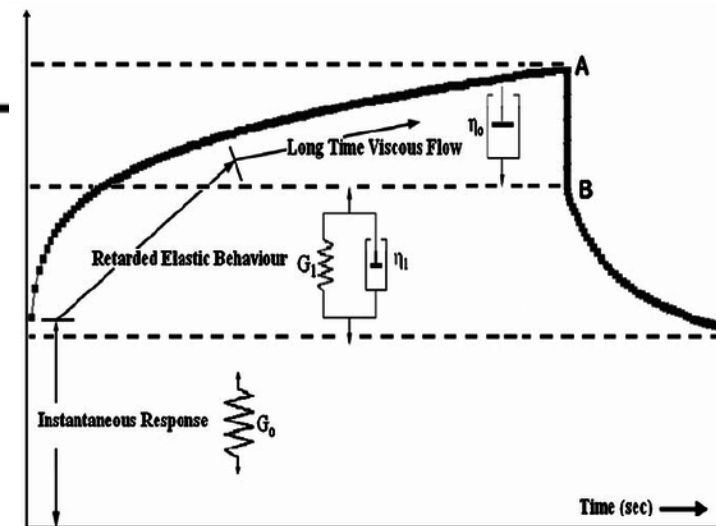
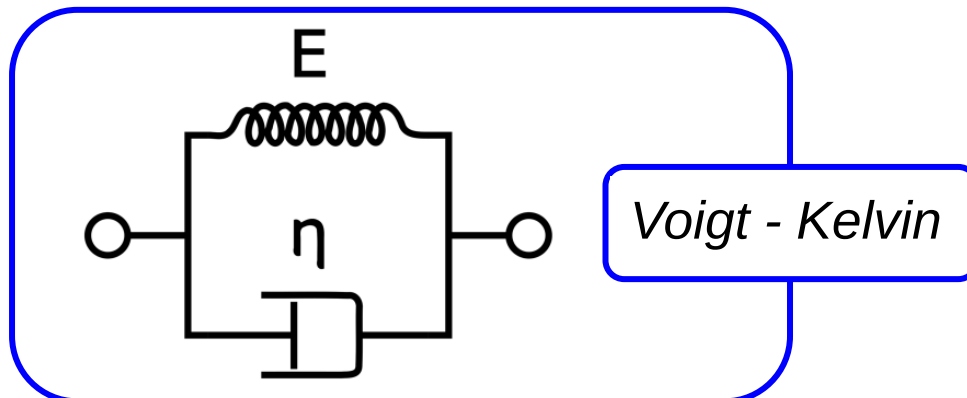
Aplica-se uma *tensão* σ_0 , numa dada *temperatura*, e observa-se $\varepsilon(t)$

Comportamento Viscoelástico

Recuperação → comportamento típico de materiais poliméricos



- e_a – deformação elástica imediata – recuperável
- e_b – deformação elástica retardada – recuperável
- e_c – deformação por escoamento plástico – deformação permanente



Modelo de Voigt-Kelvin – FLUÊNCIA

Aplica-se uma *deformação* σ_0 , numa dada *temperatura*, e observa-se $\varepsilon = f(t)$

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

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

$$\tau_R = \text{tempo de retardação} = \frac{\eta}{G}$$

onde: σ_0 = tensão aplicada em $t = 0$ s

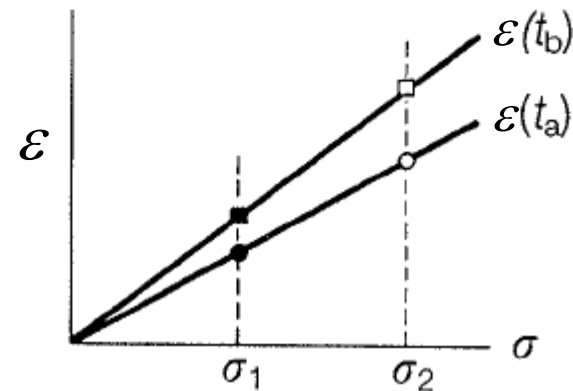
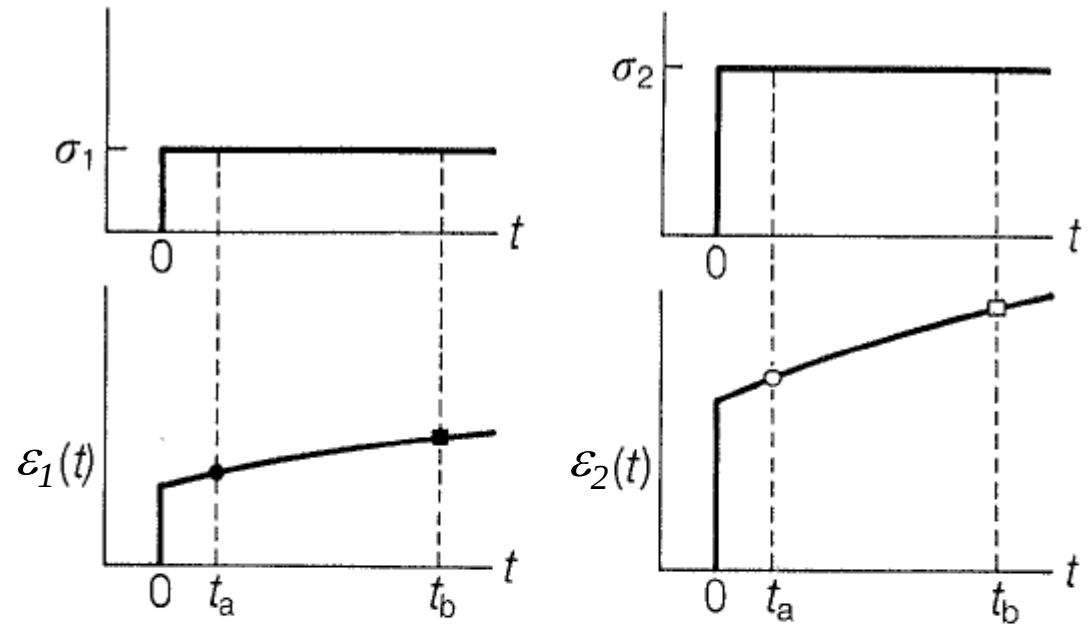
G = módulo de cisalhamento

Tensão de Cisalhamento = $G \cdot \gamma$
($\gamma = \tan \theta$)

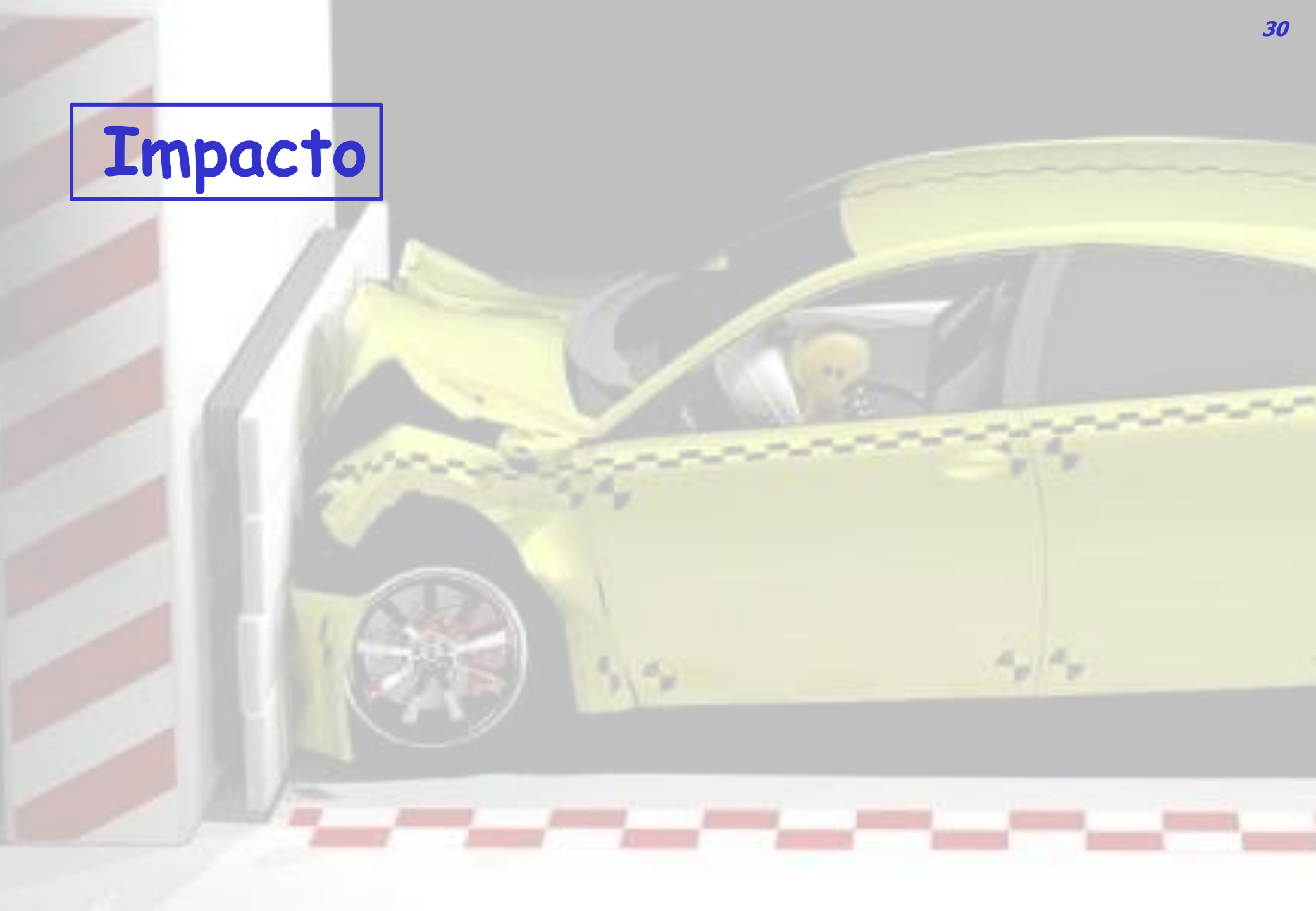
G e η são sensíveis à temperatura

Módulo de Fluência G_f (para $\sigma_0 = \text{cte}$)

$$G_f(t) = \frac{\sigma_0}{\varepsilon(t)}$$



Impacto



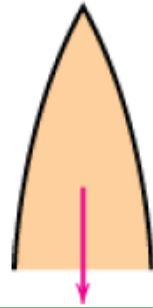
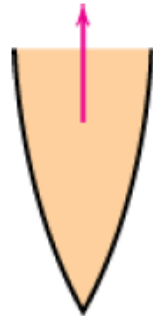
- **FRATURA** pode ser definida como sendo a separação de um corpo em dois ou mais pedaços em resposta a uma tensão (que pode ser estática ou dinâmica) em uma faixa de temperaturas que é suficientemente baixa em relação à temperatura de fusão do material.
- A tensão aplicada pode ser de tração, de compressão, de cisalhamento ou de torção, ou uma combinação desses tipos de tensões.
- Uma fratura pode ser **DÚCTIL** (“ductile”) ou **FRÁGIL** (“brittle”).
- **FRATURA DÚCTIL**
 - ocorre no final de um processo de deformação plástica → um material que sofre fratura dúctil apresenta **TENACIDADE** (*o conceito de **TENACIDADE** foi apresentado na Unidade 9*).
- **FRATURA FRÁGIL**
 - ocorre com pouca ou nenhuma deformação plástica
 - comumente é repentina e catastrófica
- Todo processo de fratura envolve duas etapas em resposta à tensão imposta → a **formação de trincas** e a sua **propagação**.

Comportamento na Fratura

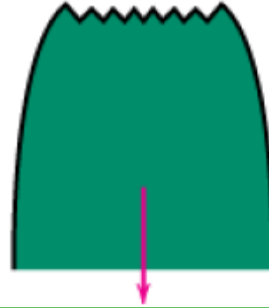
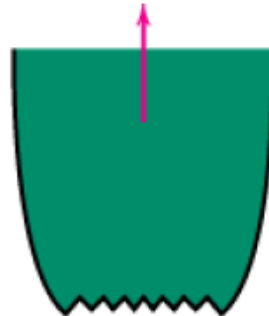
**A FRATURA DÚCTIL
NORMALMENTE É
PREFERÍVEL !!**



Muito
Dúctil



Moderadamente
Dúctil



Frágil



DUCTILIDADE (%EL)

Elevada

Moderada

Baixa

FRATURA DÚCTIL

- A deformação plástica “avisa” que o processo caminha para a fratura.
- “Absorve” energia na deformação.

FRATURA FRÁGIL

- A fratura ocorre sem “aviso” - é repentina e catastrófica.
- “Absorve” pouca energia na deformação.

Ductile vs. Brittle Failure



cup-and-cone fracture in aluminum



brittle fracture in a mild steel

NA TEMPERATURA AMBIENTE...

- ***LIGAS METÁLICAS*** são comumente *dúcteis* (embora haja materiais metálicos frágeis...).
- ***MATERIAIS CERÂMICOS*** são *frágeis*.
- ***MATERIAIS POLIMÉRICOS*** podem mostrar *os dois tipos de comportamento*.

Ensaio de Impacto

ENSAIO DE IMPACTO

- Determina o comportamento de fratura dos materiais
- Determina se existe transição dúctil-frágil

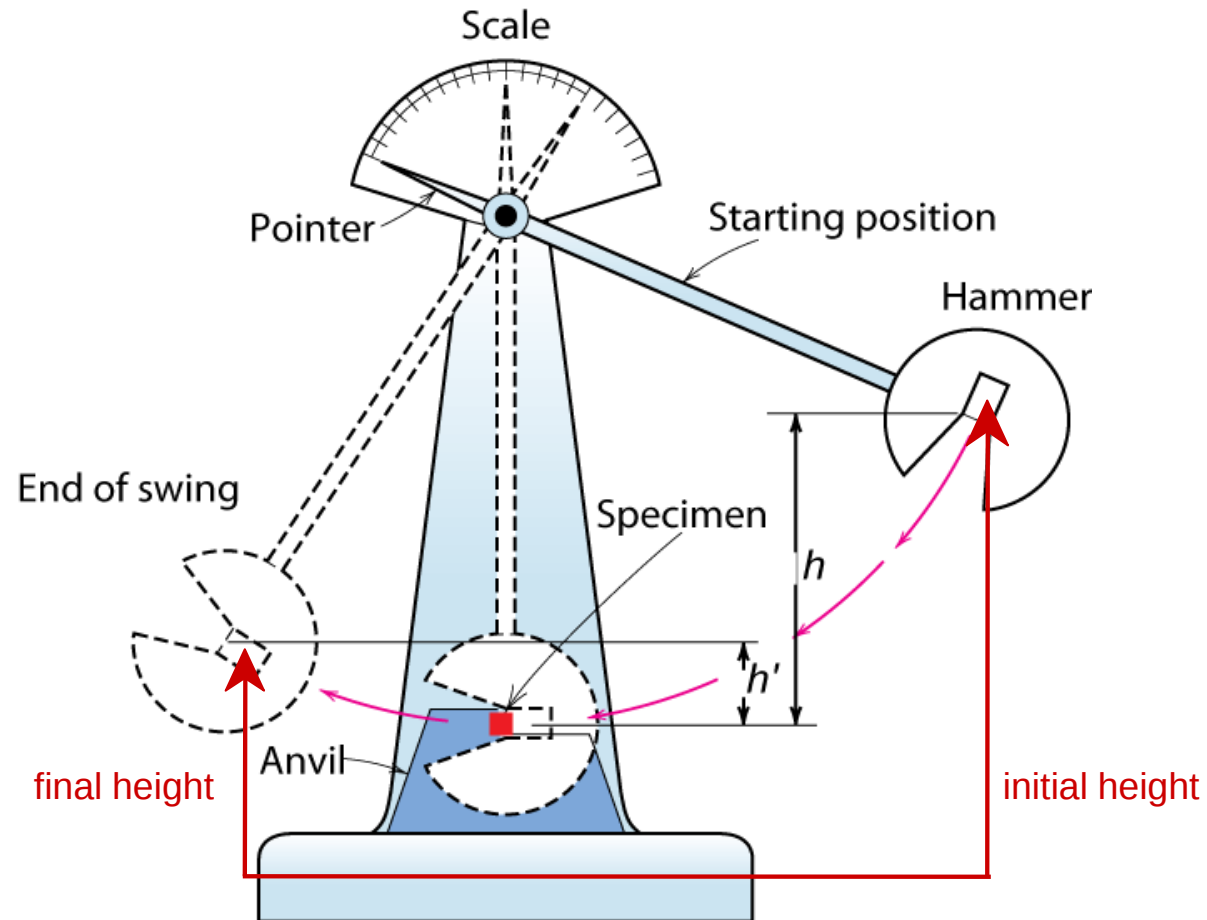
VELOCIDADE DE DEFORMAÇÃO

Ensaio de Tração Convencional

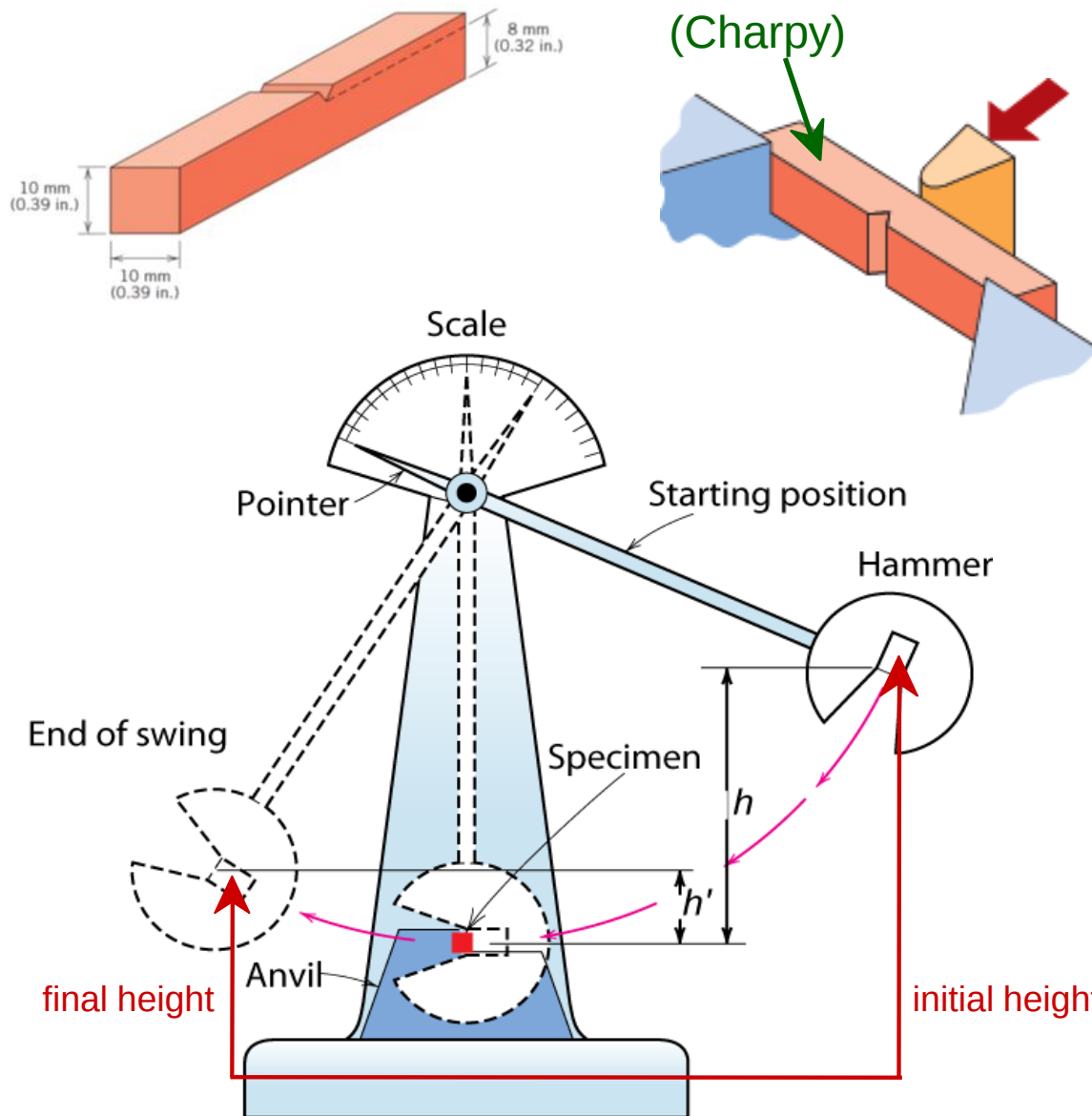
$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \dot{\varepsilon} = \text{entre } 10^{-5} \text{ e } 10^{-1} \text{ s}^{-1}$$

Solicitação de Impacto

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \dot{\varepsilon} = \text{entre } 10^2 \text{ e } 10^4 \text{ s}^{-1}$$



Ensaio de Impacto



(Charpy)

(Izod)

Detalhes dos corpos de prova e da forma de aplicação dos esforços nos ensaios Charpy e Izod

$$W_f = m \cdot g \cdot (h - h')$$

W_f : trabalho de fratura

m : massa do pêndulo

g : aceleração da gravidade

h : altura inicial do pêndulo

h' : altura final do pêndulo

Ensaio de Impacto

36



*PÊNDULO PARA POLÍMEROS
LEITURA DIGITAL*

- Ensaios realizados comumente em condições muito exigentes
 - Elevada velocidade de deformação
 - Pode ser realizado em baixas temperaturas
- Ensaios baratos
 - Equipamento e corpos de prova baratos

*PÊNDULO PARA METAIS
LEITURA ANALÓGICA*



Ensaio de Impacto

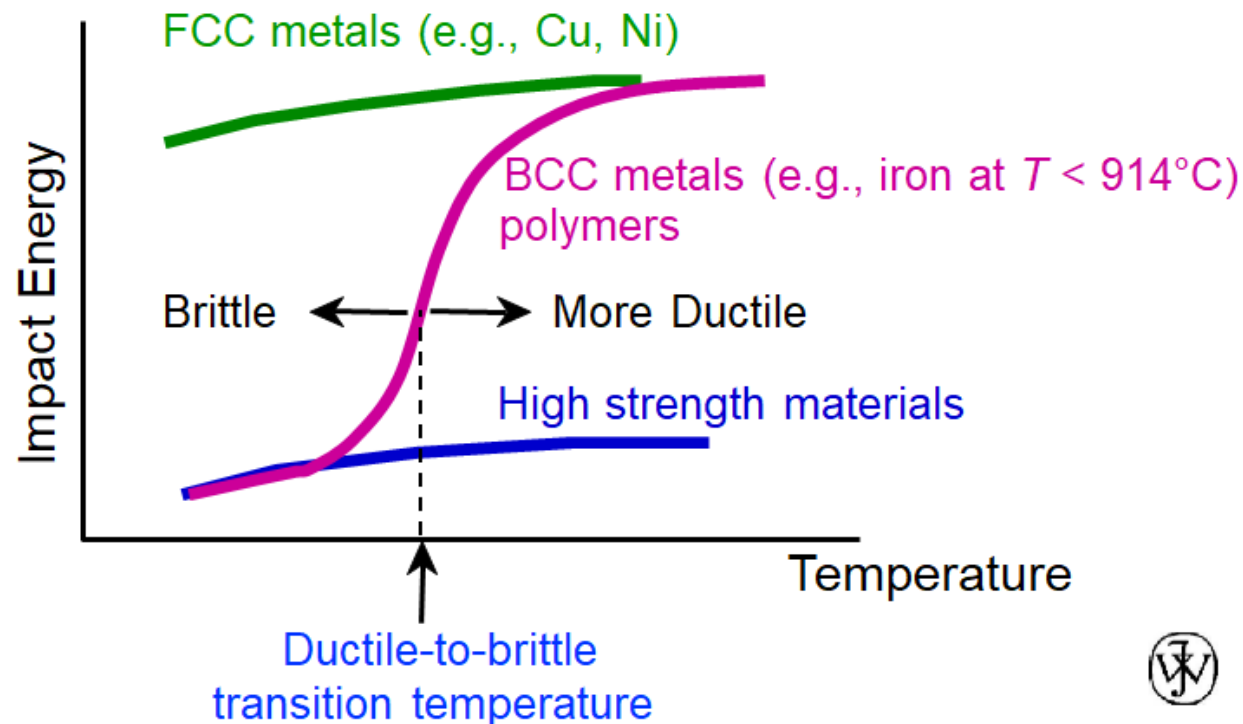
- O ensaio de impacto é uma forma mais sensível de avaliar a **TENACIDADE** dos materiais do que o ensaio de tração.
 - Entalhe nos corpos de prova concentra as tensões.
 - Elevada taxa de deformação.



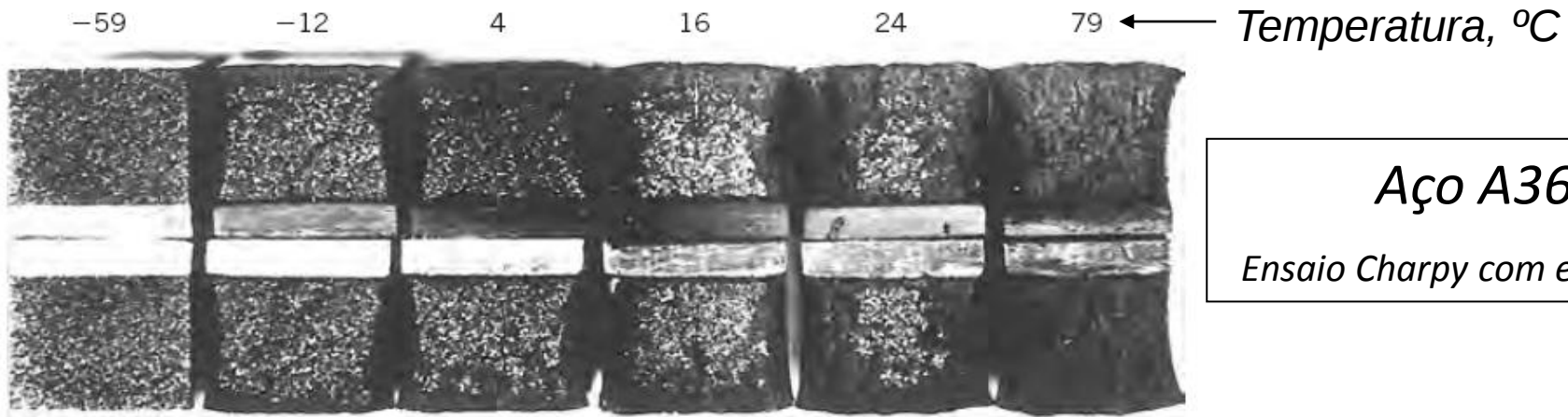
Transição Dúctil – Frágil

- Com a variação da temperatura, alguns materiais podem apresentar uma variação de comportamento quanto à fratura → materiais que tem comportamento dúctil (*apresentam TENACIDADE elevada*), podem passar a ter comportamento frágil com a diminuição da temperatura.

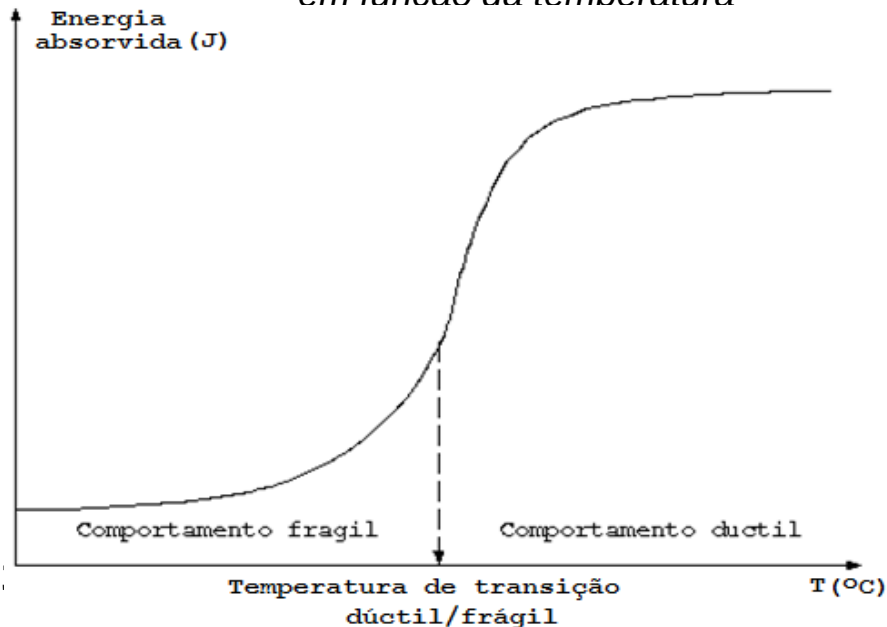
Ductile-to-Brittle Transition Temperature



Transição Dúctil – Frágil

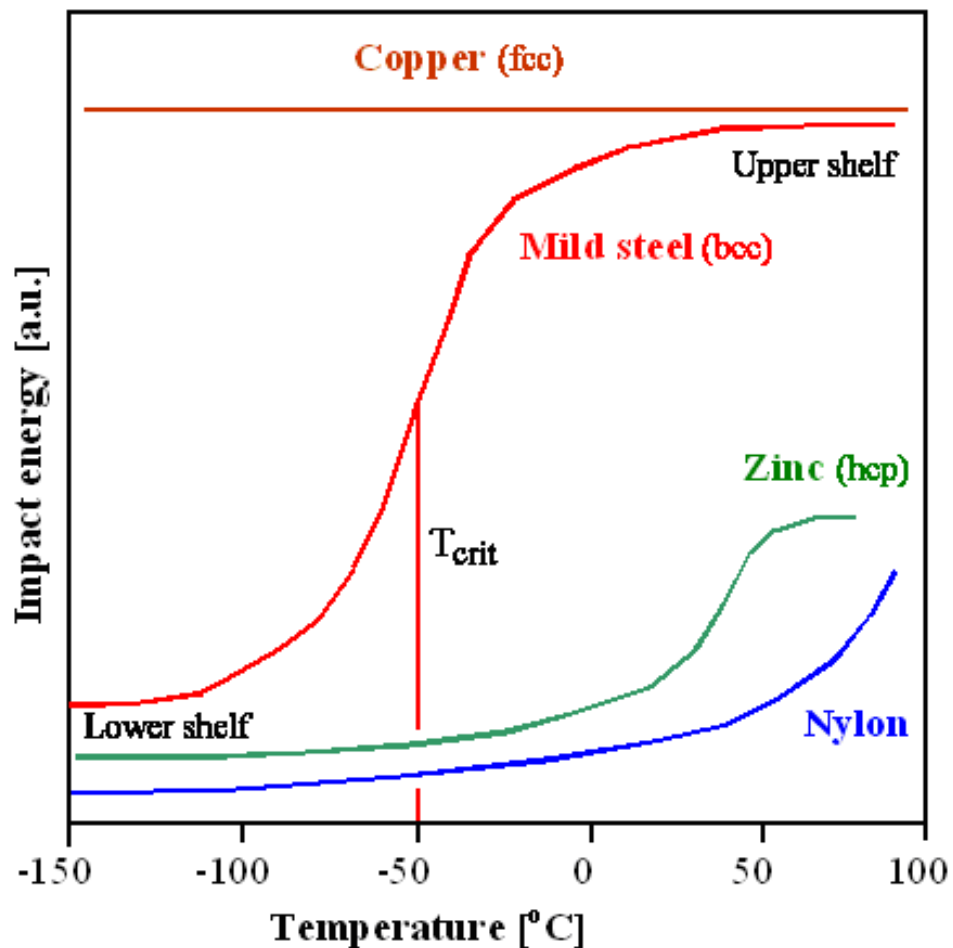


Energia absorvida no ensaio Charpy em função da temperatura

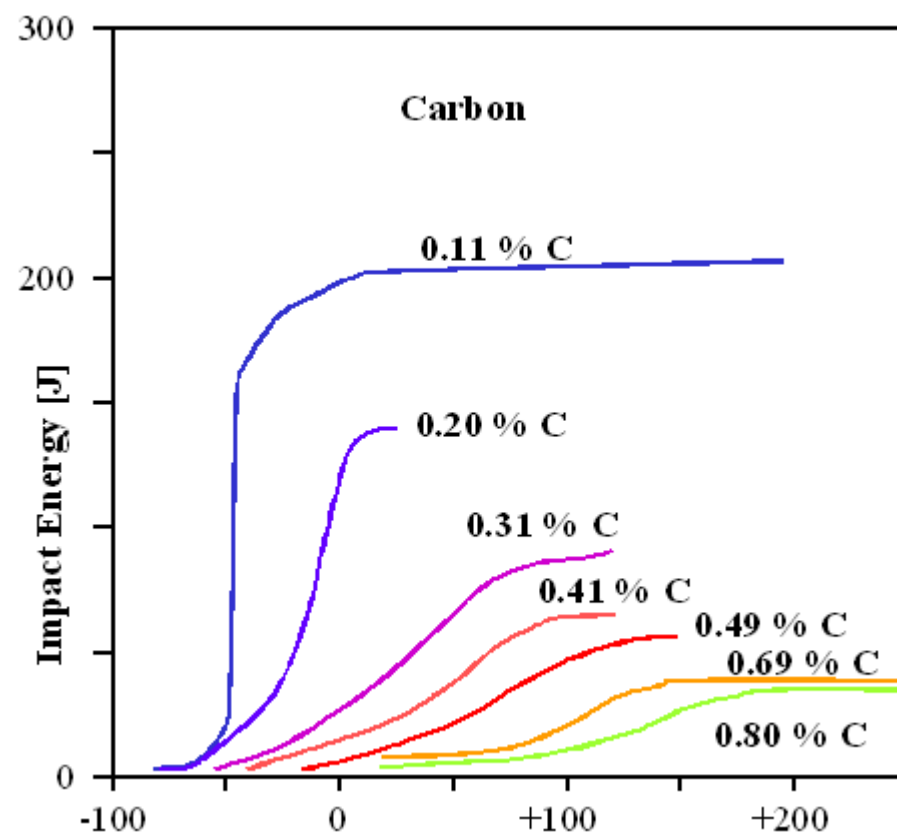


- Transição abrupta de um comportamento frágil, em baixa temperatura, para um comportamento dúctil, em alta temperatura.
- Depende fortemente da geometria da amostra e do critério para definição da temperatura de transição ⇒ cuidado em projeto para que um material não sofra essa transição em operação.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

Transição Dúctil-Frágil : Exemplos de Materiais



Aços com diferentes teores de carbono

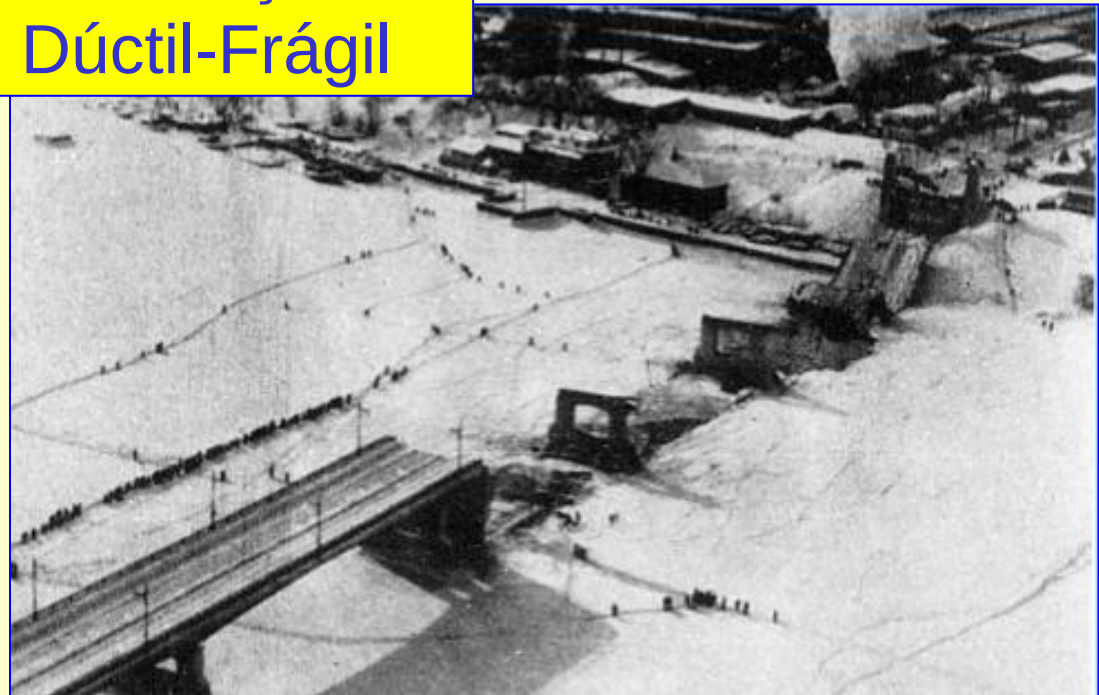




A temperatura de operação deve ser sempre superior à de transição dúctil-frágil
→ evitar a mudança de comportamento de fratura ,de dúctil para frágil (= *fratura repentina , catastrófica*), durante a operação

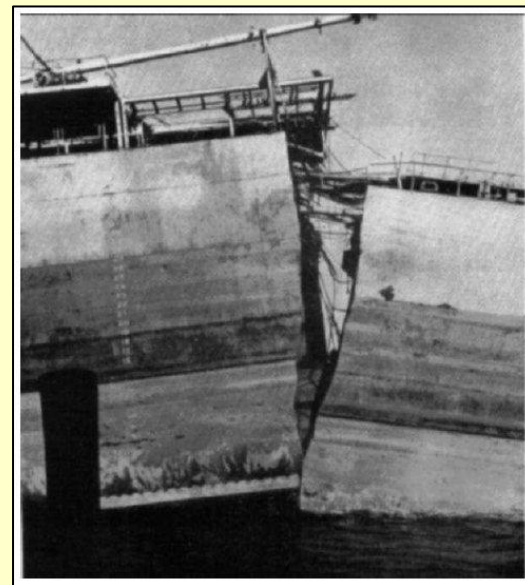
Transição Dúctil-Frágil

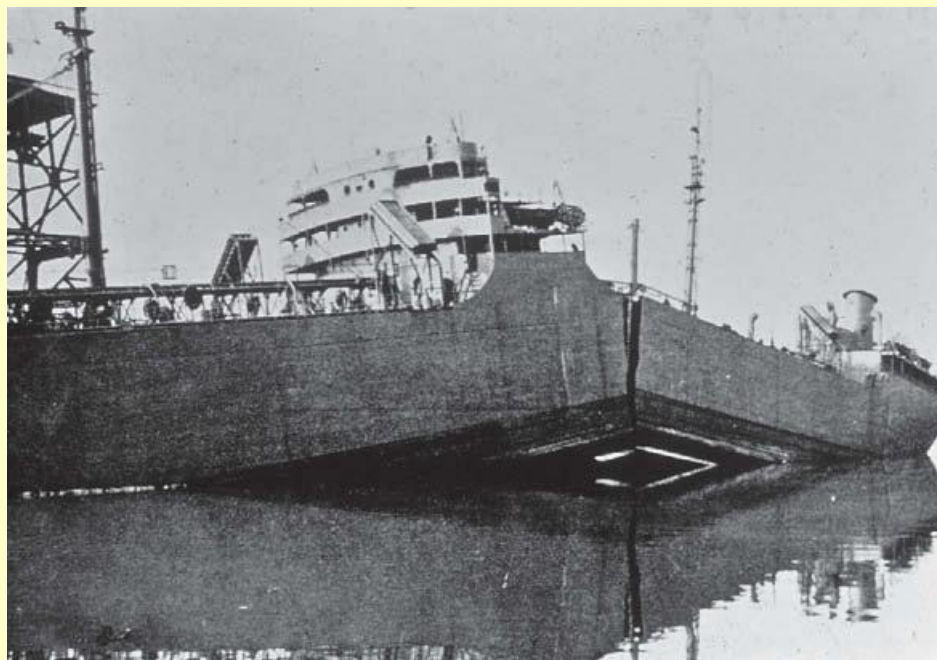
Ruptura de uma ponte metálica
(*Ponte Duplessis, Québec, 31.01.1951*). A estrutura rompeu de forma frágil numa noite de inverno (30°C negativos), num momento em que a ponte não estava sequer submetida a uma grande solicitação.
Quatro pessoas morreram.



Transição Dúctil-Frágil

‘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.

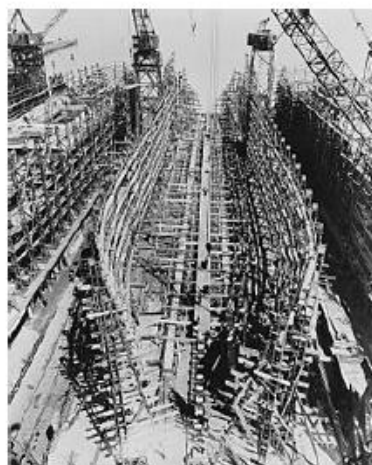




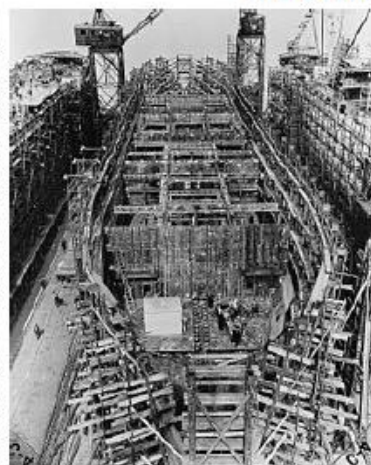
SS John W. Brown, one of three surviving operational Liberty ships, photographed in 2000

The construction of a Liberty ship at the Bethlehem-Fairfield Shipyards, Baltimore, Maryland, in March/April 1943

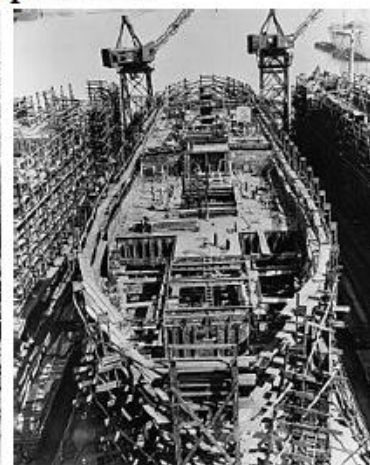
Liberty Ships



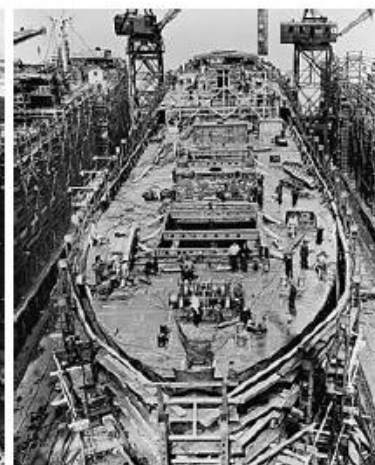
Day 2 : Laying of the keel plates



Day 6 : Bulkheads and girders below the second deck are in place



Day 10 : Lower deck being completed and the upper deck amidship erected



Day 14 : Upper deck erected and mast houses and the after-deck house in place

Liberty Ships

Structures constructed from alloys that exhibit this ductile-to-brittle behavior should be used only at temperatures above the transition temperature, to avoid brittle and catastrophic failure.

Classic examples of this type of failure occurred, with disastrous consequences, during World War II when a number of welded transport ships, away from combat, suddenly and precipitously split in half.

The vessels were constructed of a steel alloy that possessed adequate ductility according to room-temperature tensile tests. The brittle fractures occurred at relatively low ambient temperatures, at about 4°C, in the vicinity of the transition temperature of the alloy.

Each fracture crack originated at some point of stress concentration, probably a sharp corner or fabrication defect, and then propagated around the entire girth of the ship.



HISTORY UNDER THE MICROSCOPE

Constance Fligg Elam Tipper: British Metallurgist and SEM Pioneer (1894-1995)

Constance Tipper was a British metallurgist and crystallographer. Her major research contribution was discovering why during the Second World War the Liberty Ships were breaking in two. Using an early SEM and working from the Engineering Department at the University of Cambridge, UK, Tipper established that there is a critical temperature below which the fracture in steel changes from ductile to brittle.



Constance Tipper

The Liberty Ships in the North Atlantic were subjected to such low temperatures that they would have been susceptible to brittle failure. The full implications of her work were not realized until the 1950s but after that, the 'Tipper test' became the standard method for determining this form of brittleness in steel. The U.S. produced 2,751 Liberty Ships between 1941 and 1945. Only two now remain afloat.

Editor's note: An award has been created by the World Academy in Tipper's name, with the first recipient being ASM member, Diana Lados from Worcester Polytechnic Institute.

** SEM = Scanning Electron Microscope = Microscópio Eletrônico de Varredura*

...finalizando : Propriedades Mecânicas III

- Ao final do estudo dos conteúdos desta Unidade você deve ser capaz de:
 - descrever as condições que afetam a fluência em metais, em polímeros e em cerâmicas: efeito da temperatura, da tensão aplicada e do tempo.
 - esquematizar e interpretar a curva de fluência de metais : o que ocorre nos três estágios do ensaio de fluência .
 - discutir, de forma simplificada, o efeito da microestrutura nos comportamentos de fluência em metais e em cerâmicas.
 - efeito da estrutura cristalina, dos precipitados e dos contornos de grão em metais.
 - efeito da presença de fases vítreas em materiais cerâmicos.
 - descrever o comportamento viscoelástico em materiais poliméricos.
 - descrever os métodos de avaliação do comportamento viscoelástico : relaxação de tensão (modelo de Maxwell) e fluência (modelo de Voigt/Kelvin).
 - descrever o ensaio de impacto.
 - discutir, de forma simplificada, o efeito da temperatura na transição de comportamento dúctil-frágil que os materiais podem apresentar.

Referências

- **Callister, W.D.** Materials Science and Engineering: An Introduction. 7th Ed. Wiley. 2007. Caps.8 (*Impacto, Fluência*) e 16 (*Viscoelasticidade*).
 - Obs.: outras edições do livro do Callister existentes nas bibliotecas da EP, em inglês ou português, também cobrem o conteúdo apresentado nesta Unidade.
- **Askeland, D.R.; Phulé, P.P.** Ciência e Engenharia dos Materiais. Cengage Learning. 2008. Impacto: seções 6-8 e 6-9; Fluência: seções 7.9 e 7.10.
- **Shackelford, J.F.** Ciência dos Materiais. 6^a Ed. Pearson. 2008. Seção 6.5 - Fluência e relaxamento de tensão.
- **Padilha, A.F.** – Materiais de Engenharia. Hemus. São Paulo. 1997. Cap. 14 .