

# LOM3016 – Introdução à Ciência dos Materiais

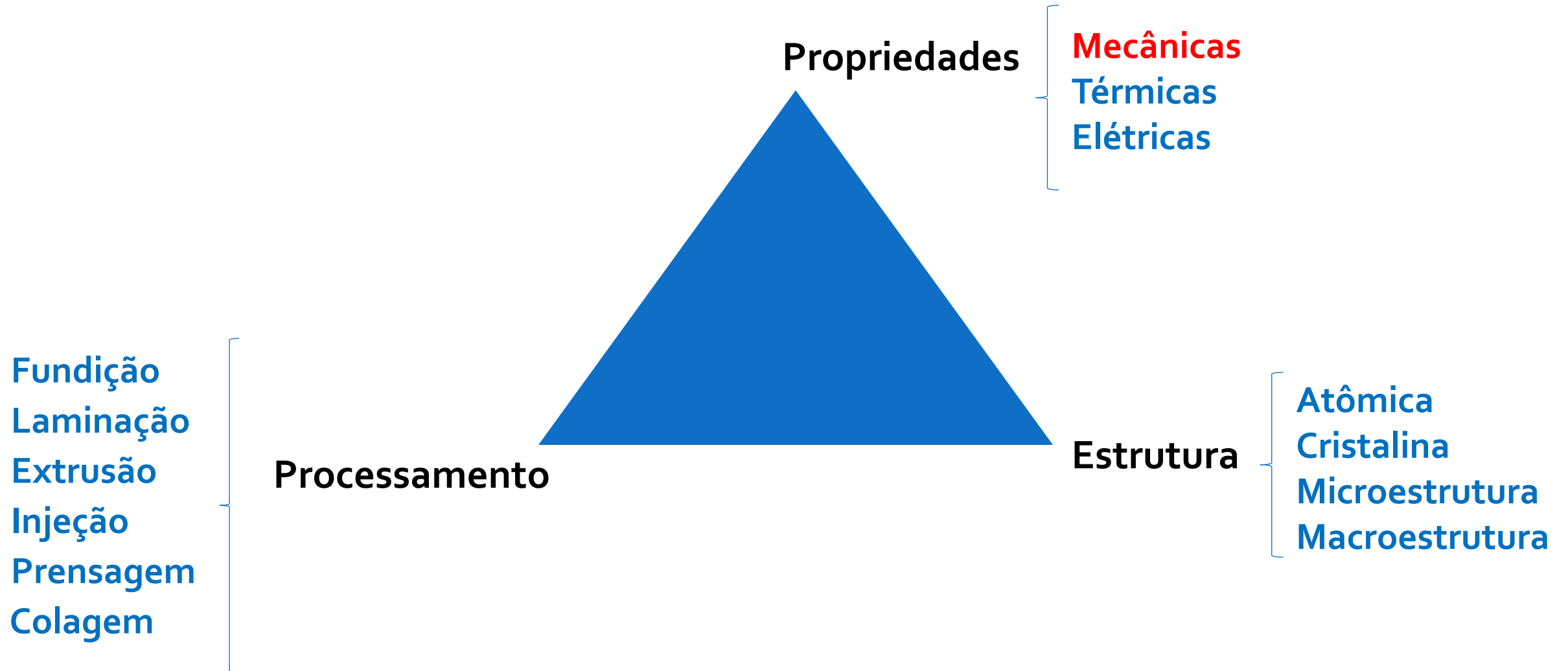


## Aula 8 – Propriedades Mecânicas dos Materiais – Parte 1

Kelly Benini



# Introdução



# O que vamos ver nessa aula?



- Propriedades no Estado Sólido
- Como são determinadas as propriedades mecânicas
- Classificação dos Ensaios Mecânicos
- Conceitos de tensão e de deformação
- Ensaio de dureza

# Propriedades no estado sólido

## Físicas

- Propriedades Elétricas (condutividade elétrica, resistividade elétrica, etc.)
- Propriedades Magnéticas (permeabilidade magnética; força coercitiva, indução magnética, etc.)
- Propriedades Térmicas (condutividade térmica; dilatação térmica, etc.)
- Propriedades Óticas (transparência; índice de refração, etc)

## Mecânicas

- Resistência à tração e compressão;
- Resistência a flexão transversal;
- Resistência ao impacto;
- Resistência à fadiga, à fluência;
- Dureza;
- Plasticidade/ductilidade e tenacidade.

# Como são determinadas as propriedades

As propriedades são determinadas a partir da realização de ensaios.



Os ensaios devem ser realizados seguindo procedimentos específicos que são descritos em normas técnicas nacionais e internacionais tais como:

**ABNT** – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
**ASTM** – *American Society for Testing and Materials*  
**ISO** – *International Standard Organization*  
**DIN** – Deutsche Industrie Normen



**Definem alguns parâmetros como:**

- ✓ **Forma e dimensões dos corpos de prova;**
- ✓ **Velocidade do ensaio;**
- ✓ **Condições ambientais;**
- ✓ **Número de corpos de prova;**

# Classificação dos Ensaios Mecânicos

## Quanto à integridade

- Destrutivos: provocam inutilização parcial ou total da peça. Ex.: Tração, Fadiga, Fluência, Impacto, Torção, Flexão, Tenacidade à fratura
- Não destrutivos: não comprometem a integridade da peça. Ex.: Raios-X, Ultra-som, Líquidos penetrantes, Microdureza

## Quanto à velocidade

- Estáticos: carga aplicada lentamente (estado de equilíbrio). Ex.: Tração, Compressão, Flexão, Dureza e Torção
- Dinâmicos: carga aplicada rapidamente ou ciclicamente. Ex.: Fadiga e Impacto
- Carga constante: carga aplicada durante um longo período de tempo. Ex.: Fluência

# Classificação dos Ensaio

**Estáticos:** carga aplicada lentamente  
(estado de equilíbrio)

- Tração
- Compressão
- Flexão
- Torção
- Dureza

Diagrama Tensão x  
Deformação

**Tensão** – é uma medida da intensidade de forças internas atuando dentro de um corpo deformável consequente de forças externas causando uma deformação relativa deste corpo. Assim, mede a força média por unidade de área e, portanto, a sua dimensão é aquela da pressão.

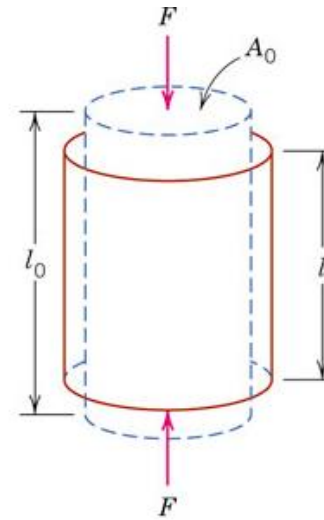
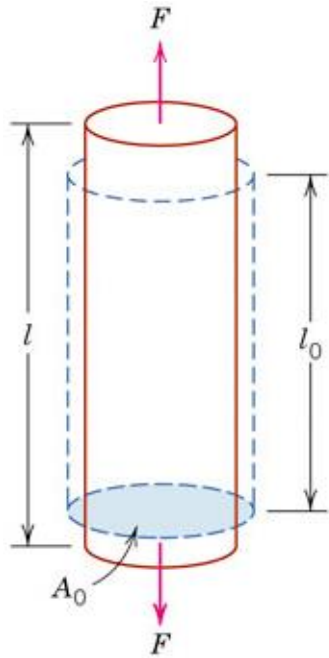
$$\sigma = \frac{F}{A} \text{ (Pa ou MPa)}$$

Onde:  $\sigma$  = Tensão mecânica  $F$  = Força  $A$  = Área

**Deformação** – em ciência dos materiais, é a mudança na forma, ou dimensão, de um corpo devido a uma força aplicada ou mudança de temperatura.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \text{ (mm/mm)}$$

# Tipos de Tensões



Tensão Uniaxial – Força aplicada sobre o corpo é perpendicular às suas superfícies



Ensaio de Tração e Compressão



Curva Tensão x Deformação



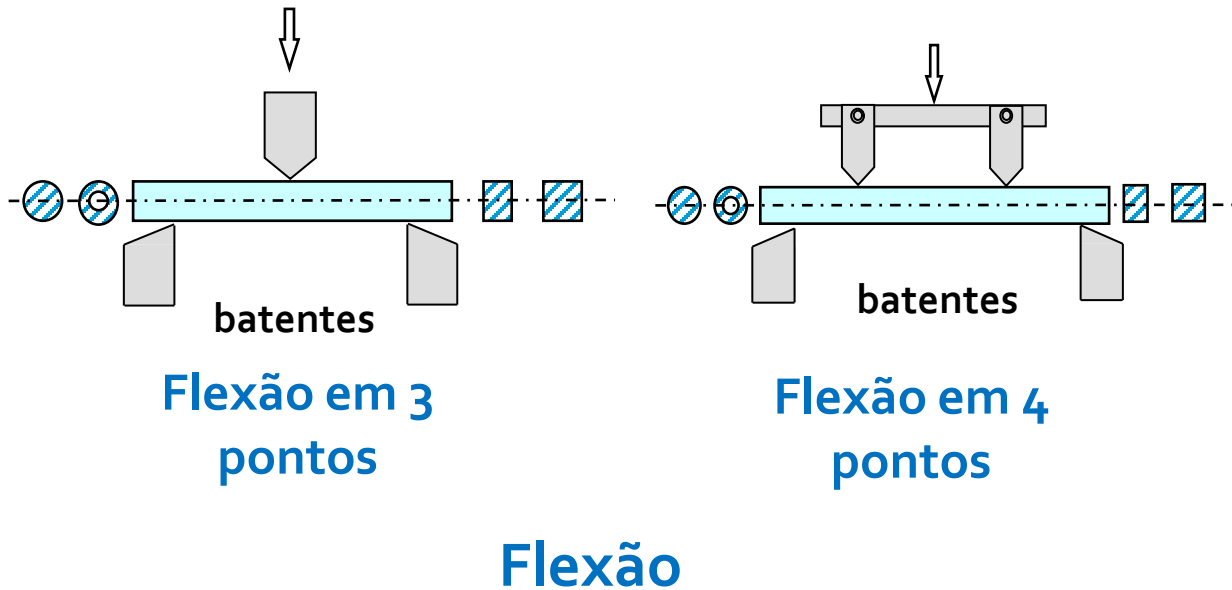
Tração



Compressão



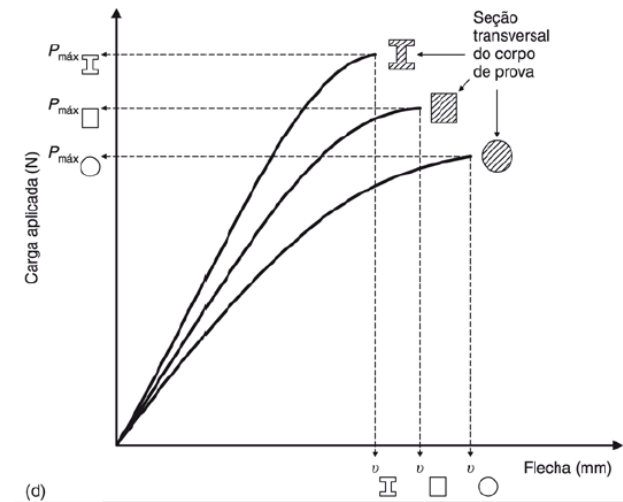
# Tipos de Tensões



A flexão é a deformação de um corpo, produzida por uma carga que atua **na direção perpendicular ao seu eixo longitudinal.**

## Ensaio de Flexão

✓ Resultado do Ensaio: Gráfico carga x deformação (deflexão)



$$\sigma_f = \frac{F \cdot L \cdot y_{LN}}{4I}$$

✓ Resistência a flexão ( $\sigma_f$ )

$$f = \frac{1}{48} \times \frac{FL^3}{E \cdot I}$$

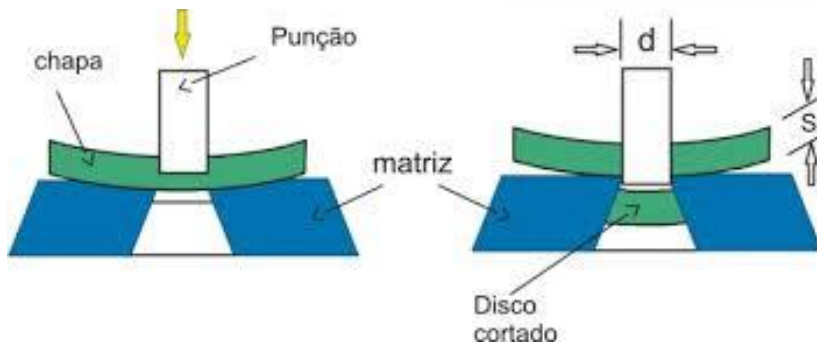
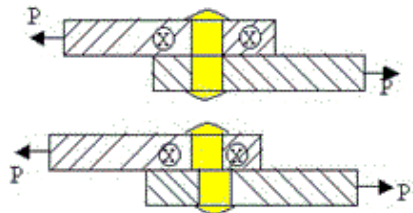
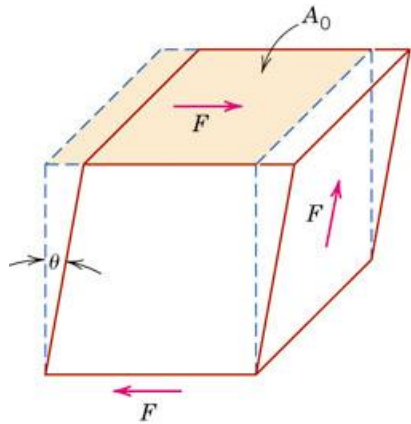
✓ Deformação elástica ou Flecha (f)

$$E = \frac{1}{48} \times \frac{FL^3}{f \cdot I}$$

✓ Módulo de elasticidade ( $E_f$ )

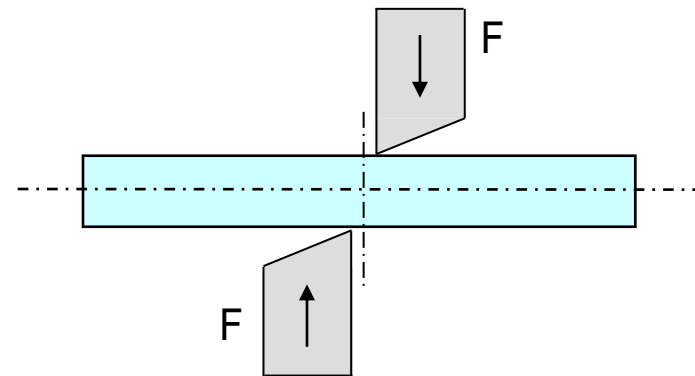
# Tipos de Tensões

## Cisalhamento



Tensão de Cisalhamento Puro- Força aplicada sobre o corpo é paralela às suas superfícies

## Ensaio de Cisalhamento

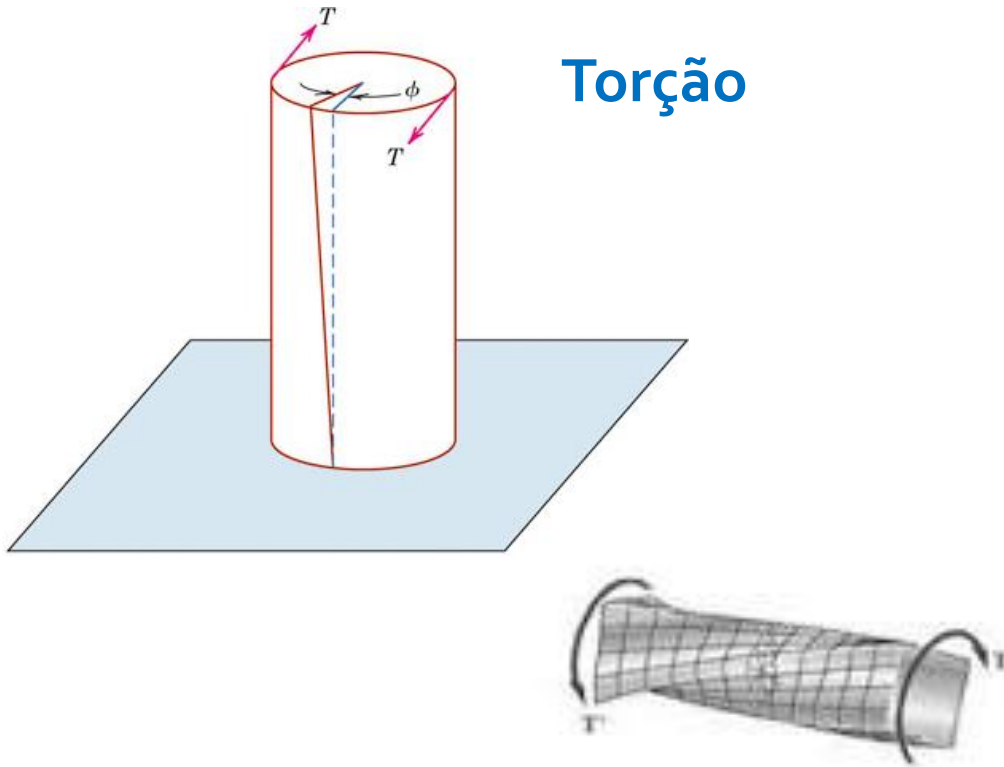


$$\tau_p = \frac{F}{S_0}$$

# Tipos de Tensões

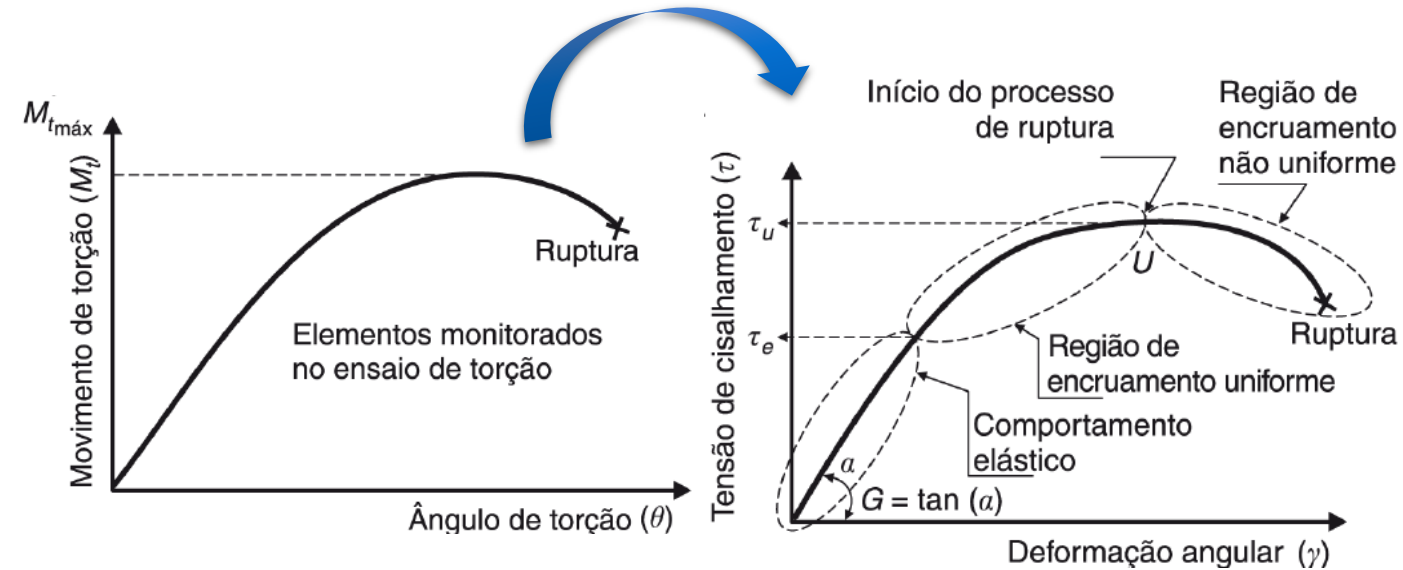
## Ensaio de Torção

### Torção



A torção é uma variação do **cisalhamento puro**, onde um membro estrutural é torcido e as forças torcionais produzem um movimento de rotação em torno do eixo longitudinal de uma das extremidades do membro em relação à outra.

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{16.Mt_{m\acute{a}x}}{\pi D^3}$$



$$\gamma = \frac{R\theta}{L}$$

# Ensaio de Dureza



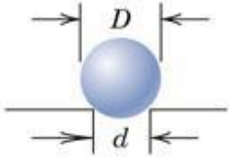
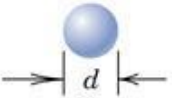
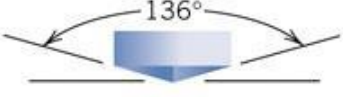

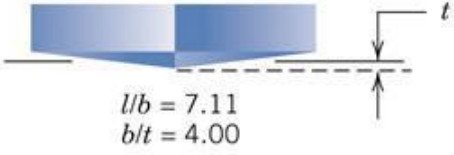
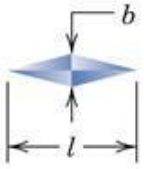
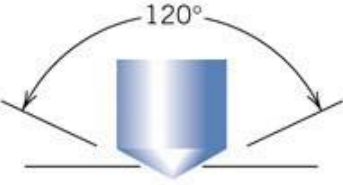


## Definição

- Consiste na aplicação de uma carga na superfície do material utilizando um penetrador padronizado que produz uma marca superficial;

## Utilização

- Utilizado na indústria (controle de especificação de matéria-prima e fabricação de produtos finais); tratamentos superficiais, vidros e laminados
- Materiais Metálicos, Poliméricos e Cerâmicos

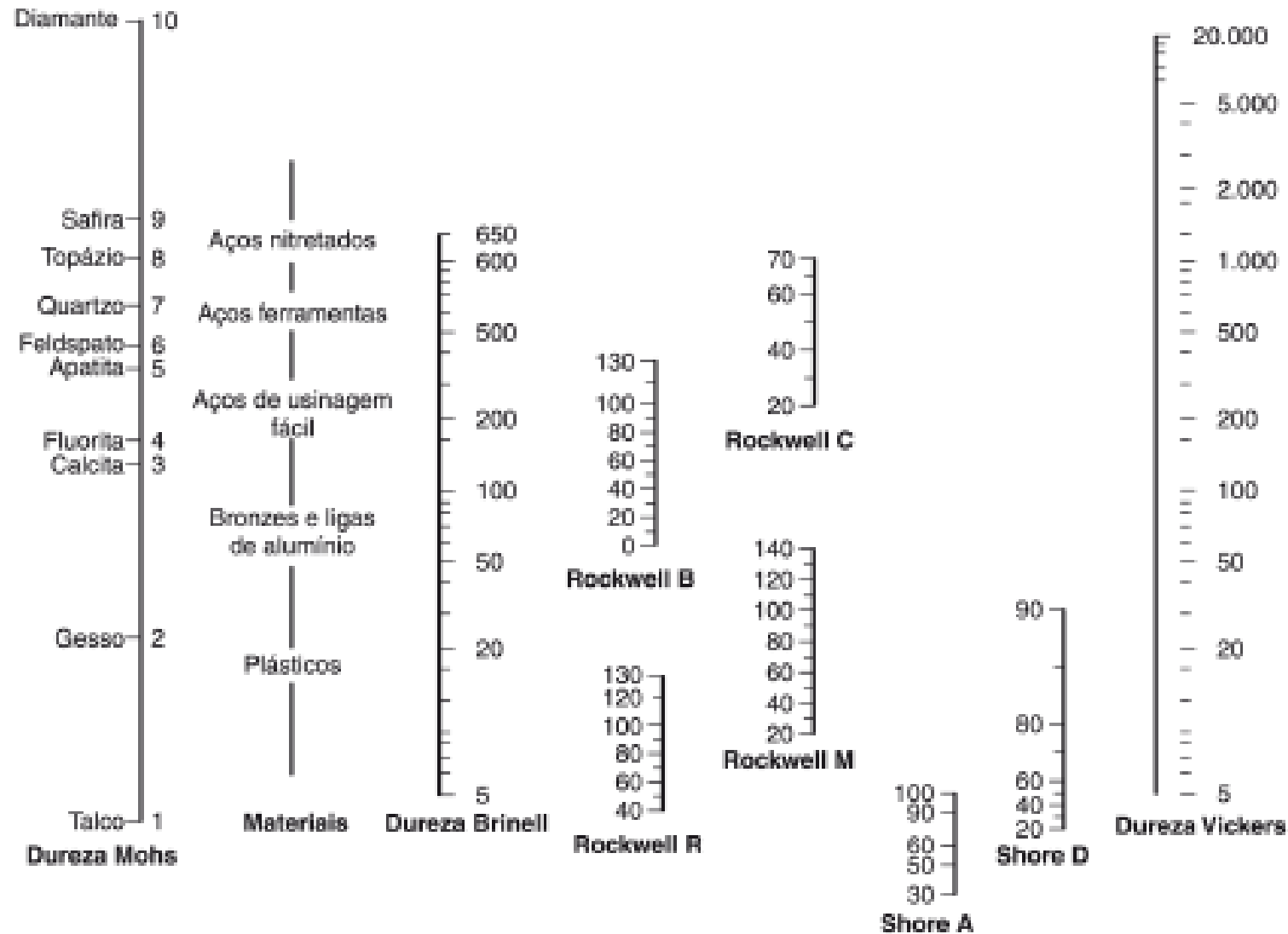
# Ensaio de Dureza

Test	Indenter	Shape of Indentation		Load	Formula for Hardness Number <sup>a</sup>
		Side View	Top View		
Brinell	10-mm sphere of steel or tungsten carbide			$P$	$HB = \frac{2P}{\pi D [D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$
Vickers microhardness	Diamond pyramid			$P$	$HV = 1.854P/d_1^2$
Knoop microhardness	Diamond pyramid			$P$	$HK = 14.2P/l^2$
Rockwell and Superficial Rockwell	<ul style="list-style-type: none"> <li>Diamond cone;</li> <li><math>\frac{1}{16}, \frac{1}{8}, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}</math> in. diameter steel spheres</li> </ul>		 	<ul style="list-style-type: none"> <li>60 kg</li> <li>100 kg</li> <li>150 kg</li> </ul> Rockwell <ul style="list-style-type: none"> <li>15 kg</li> <li>30 kg</li> <li>45 kg</li> </ul> Superficial Rockwell	

<sup>a</sup> For the hardness formulas given,  $P$  (the applied load) is in kg, while  $D$ ,  $d$ ,  $d_1$ , and  $l$  are all in mm.

**Source:** Adapted from H. W. Hayden, W. G. Moffatt, and J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. III, *Mechanical Behavior*. Copyright © 1965 by John Wiley & Sons, New York. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.

# Ensaio de Dureza



# REFERÊNCIAS E BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- CALLISTER JR., W. D; RETHWISCH, D.G.. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Um introdução**, 8ª ed, Rio de Janeiro: LTC, 2015.
- CALLISTER JR, W.D. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 7 th Ed. Wiley.
- GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos Materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2000.
- SOUZA, S. A. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos**. Fundamentos teóricos e práticos. 5 ed., São Paulo: Edgard Blucher, 1982.



***Muito  
obrigada!***

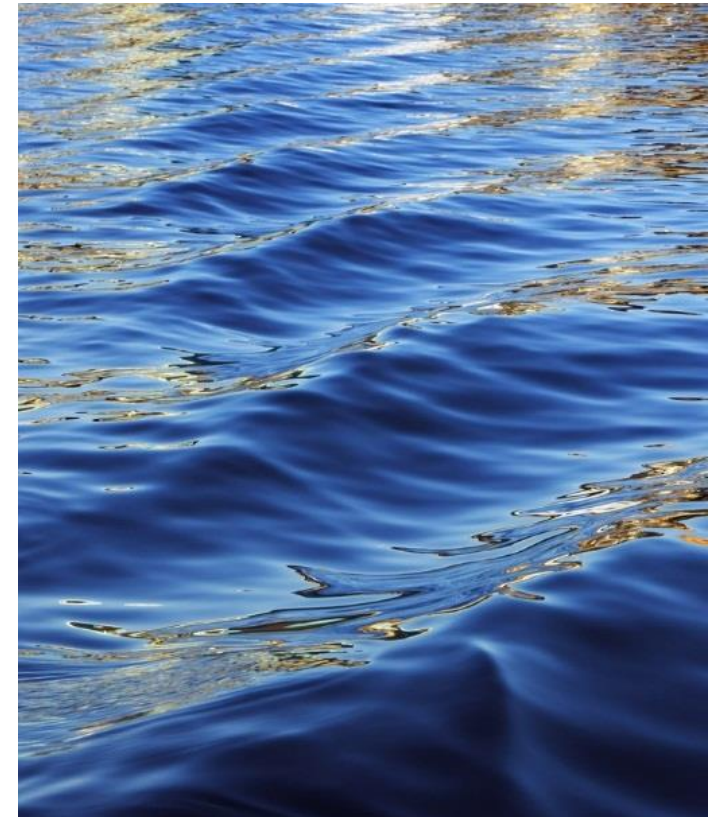


# LOM3016 – Introdução à Ciência dos Materiais



## Aula 8 – Propriedades Mecânicas dos Materiais – Parte 2

Kelly Benini

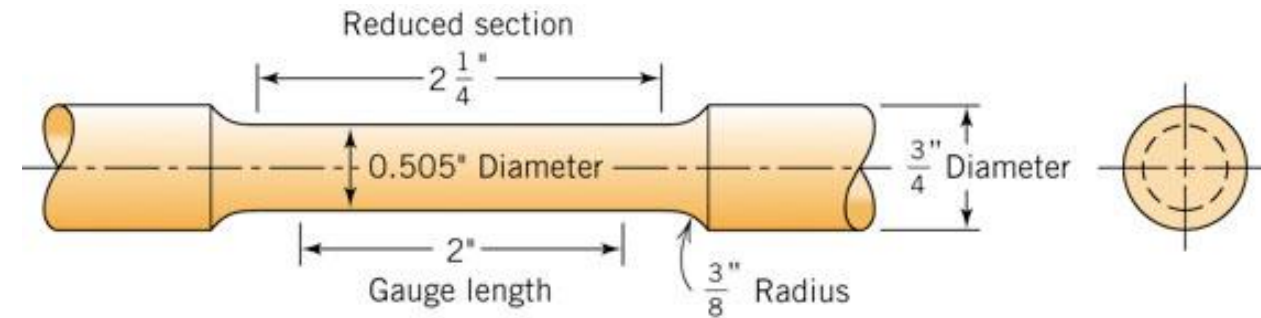
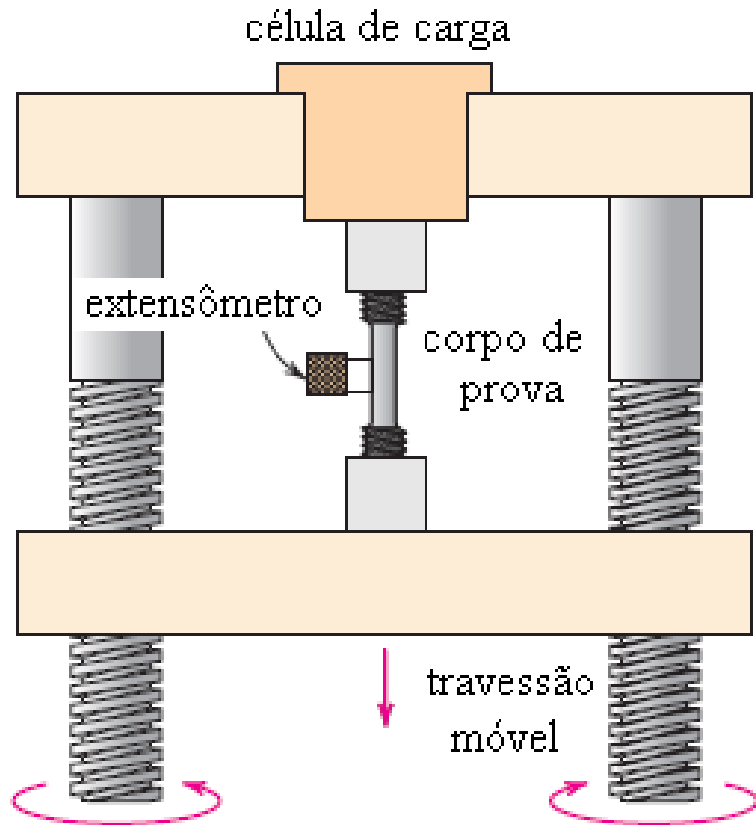


# O que vamos ver nessa aula?

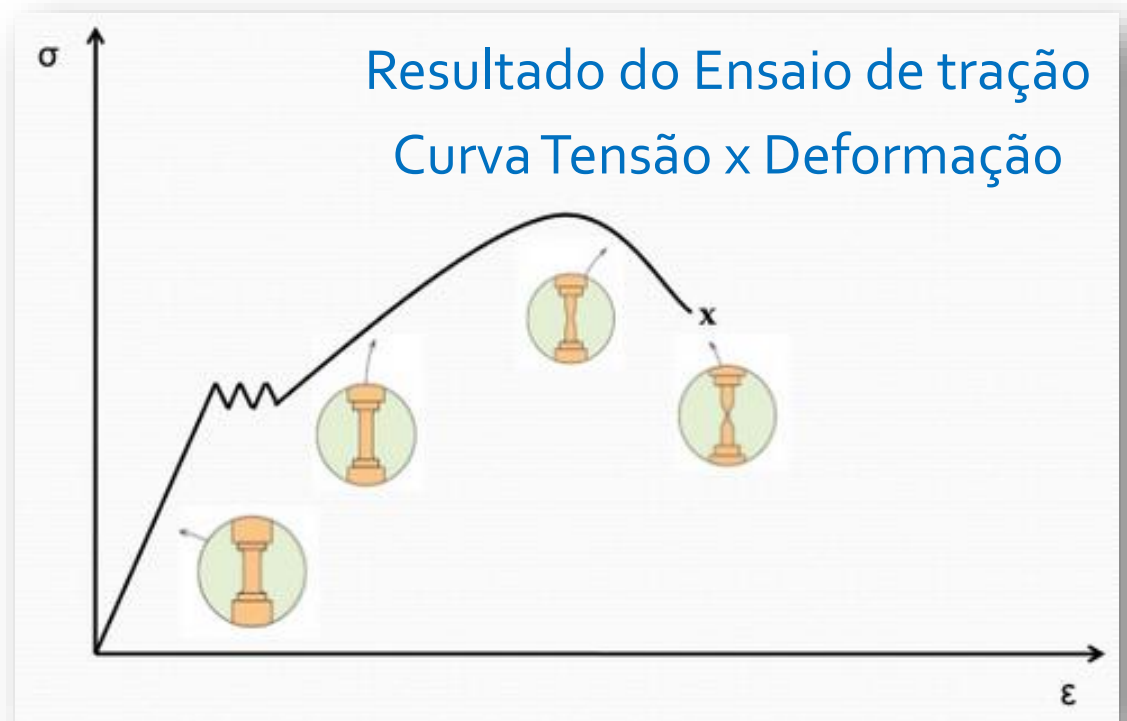


- Ensaio de tração
- Curva Tensão x Deformação

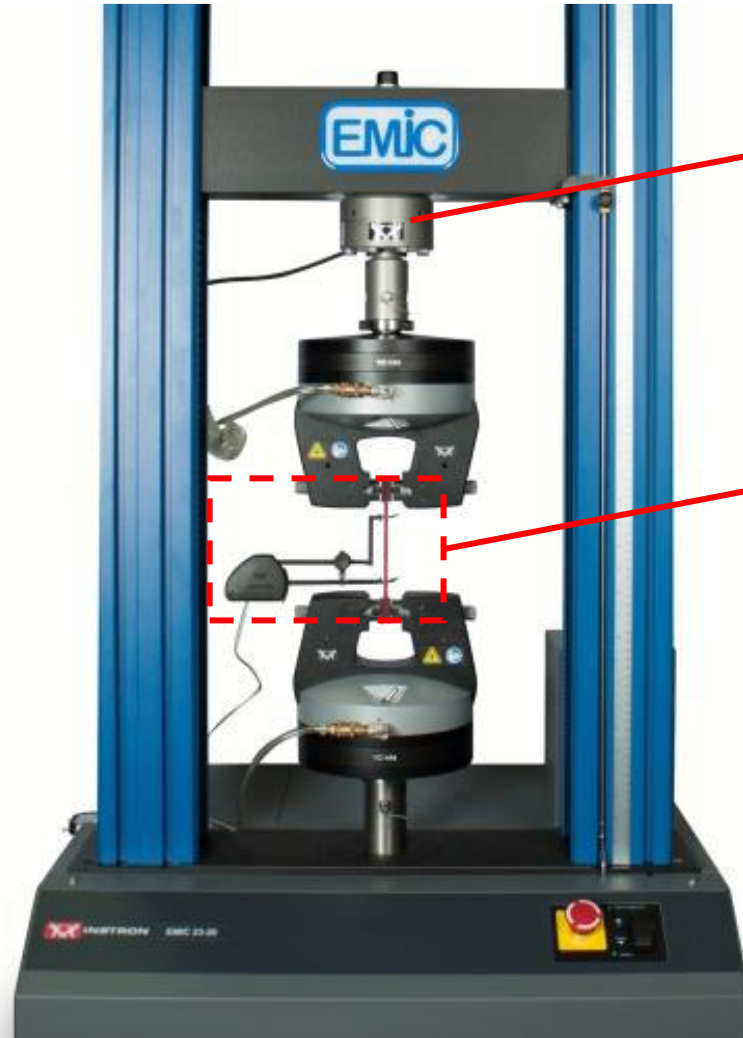
# Ensaio de Tração



Consiste em submeter o material à uma **carga axial** ou força de tração crescente, que promove uma deformação progressiva e **aumento de comprimento** do corpo de prova.



# Ensaio de Tração



Célula de Carga

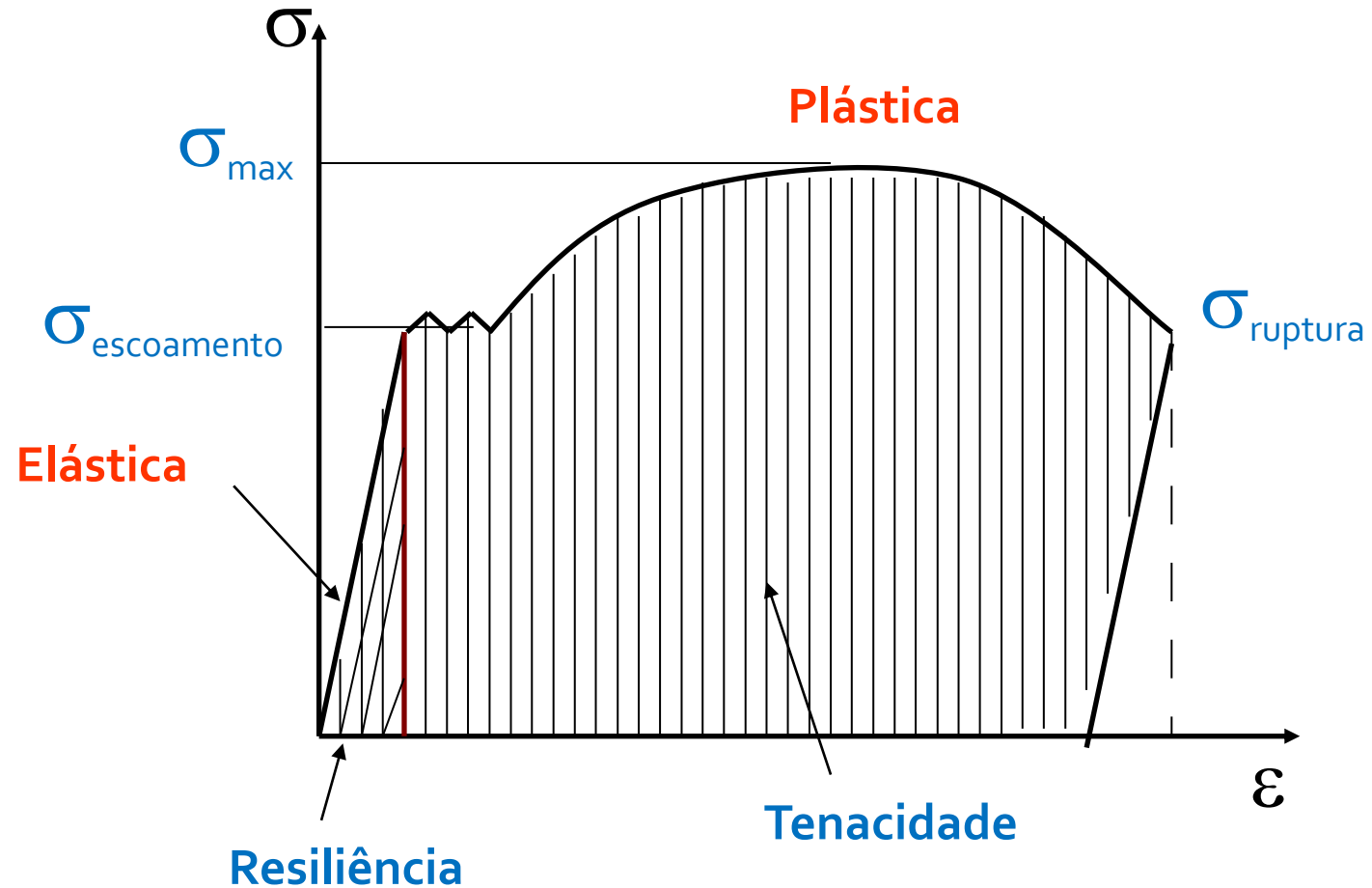


Extensômetro Mecânico

## Máquina Universal de Ensaio Mecânicos

# Diagrama Tensão x Deformação

Informações importantes a partir do diagrama  $\sigma \times \varepsilon$



# Diagrama Tensão x Deformação

Informações importantes a partir do diagrama  $\sigma \times \varepsilon$

## Tensão

- Máxima
- Escoamento
- Ruptura

## Deformação

- Elástica
- Plástica

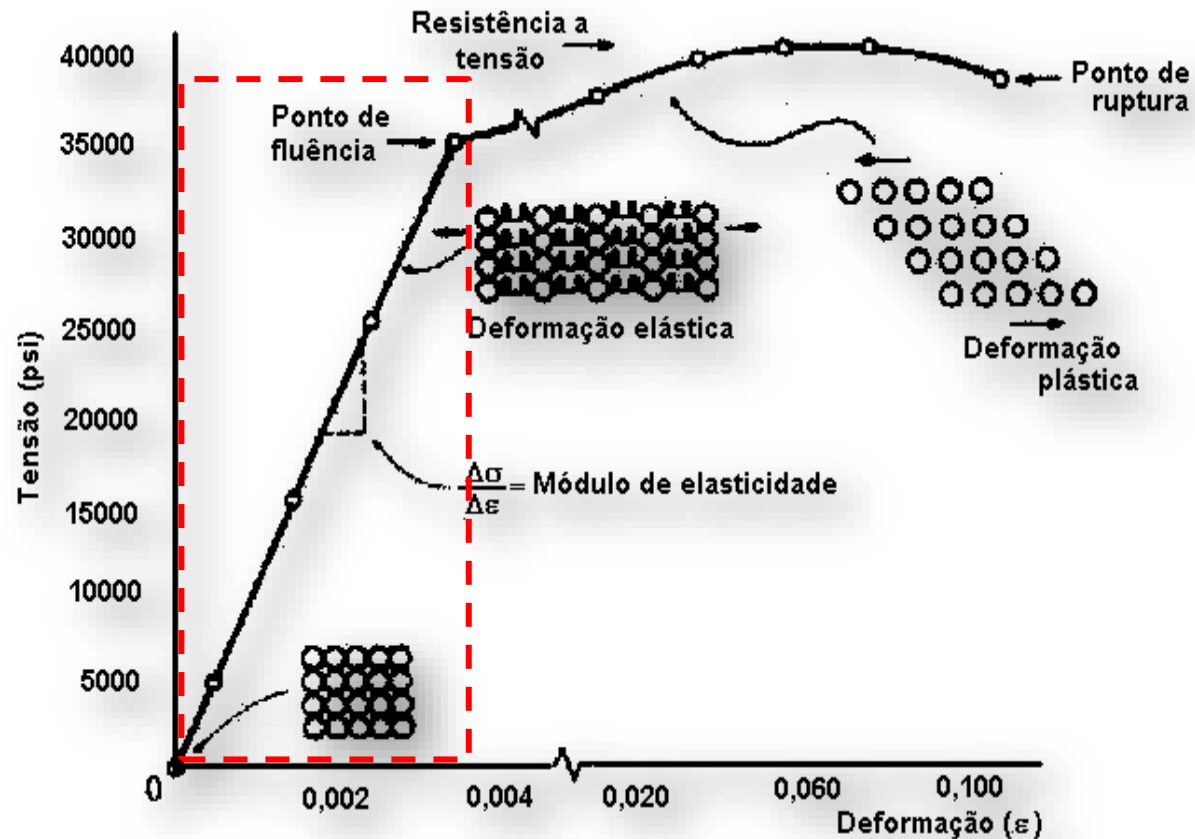
## Ductilidade

## Tenacidade

## Resiliência

# Diagrama Tensão x Deformação

## Região Elástica: 1ª REGIÃO DO DIAGRAMA $\sigma \times \epsilon$



✓ Deformação elástica;

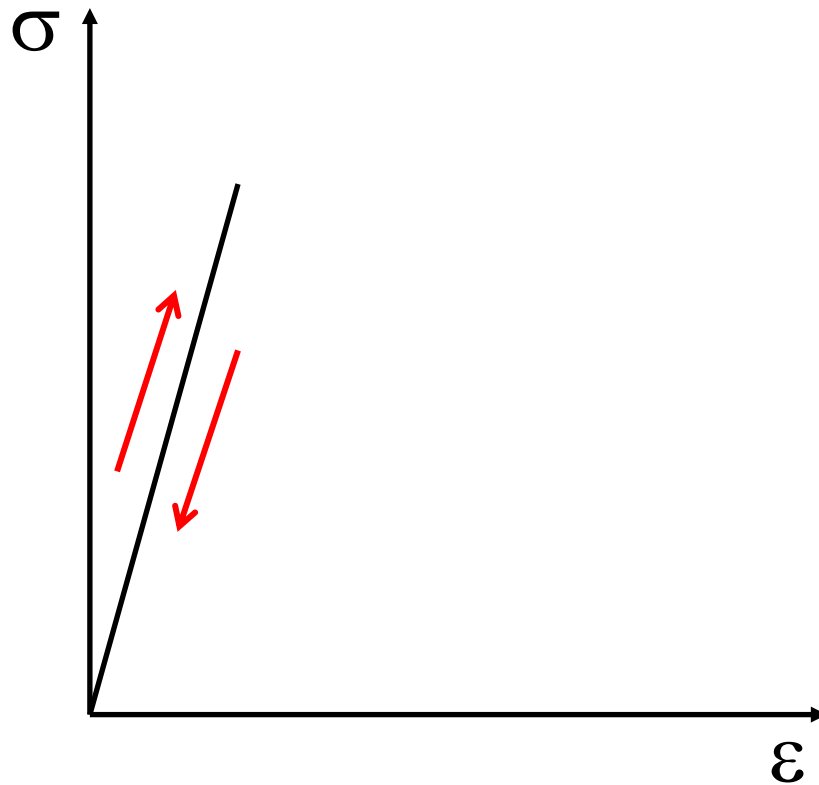
✓ Limite de proporcionalidade;

✓ Módulo de elasticidade;

✓ Resiliência

# Diagrama Tensão x Deformação

## Deformação Elástica



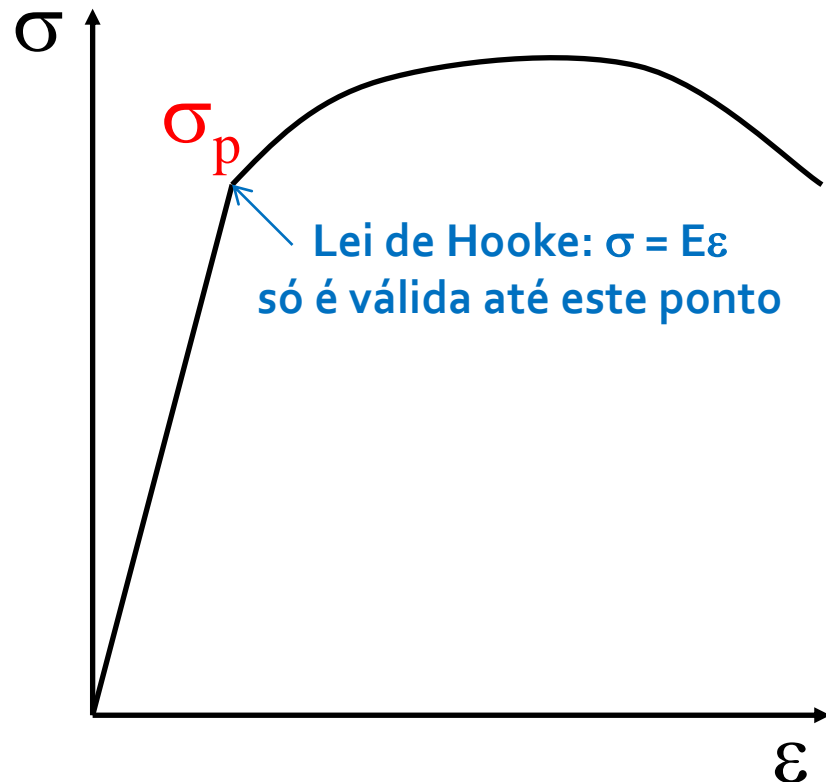
Não são permanentes, isto é, são deformações que desaparecem quando a tensão aplicada é retirada. Dito de outra forma, as deformações elásticas são reversíveis, sendo resultado da ação de forças conservativas.

- ✓ **Precede à deformação plástica;**
- ✓ **É reversível;**
- ✓ **Desaparece quando a tensão é removida;**



# Diagrama Tensão x Deformação

Limite de Elasticidade ou de Proporcionalidade - P

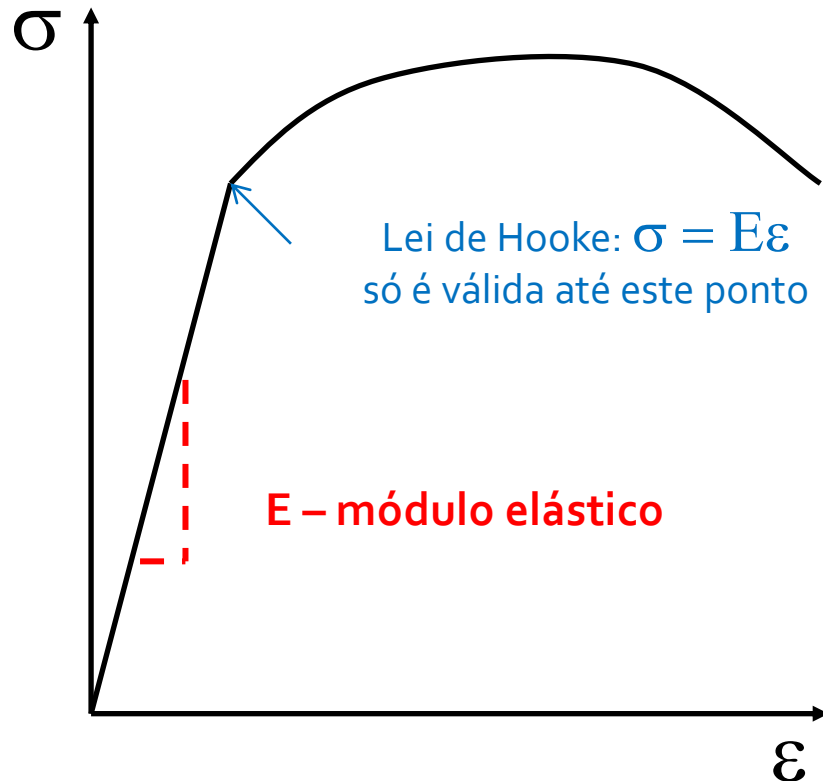


Tensão Proporcional -  $\sigma_p$   
Máxima tensão que o material suporta sem sofrer deformação permanente após a retirada da carga

# Diagrama Tensão x Deformação

Módulo de Elasticidade ou Módulo de Young:

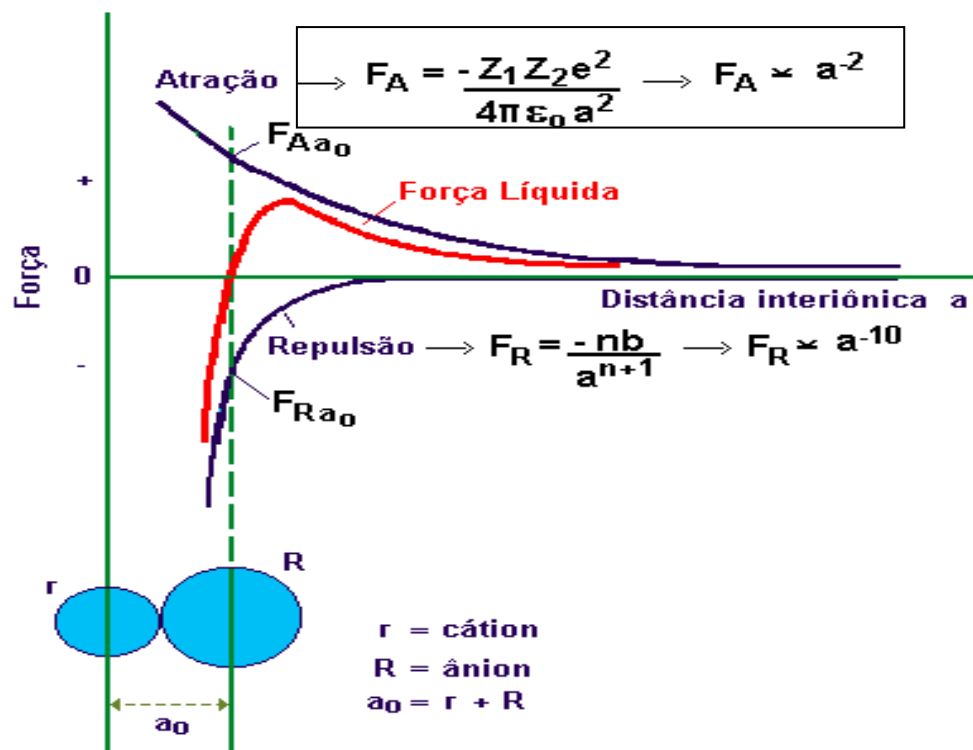
$$E = \sigma / \varepsilon \text{ (Kgf/mm}^2, \text{ GPa)}$$



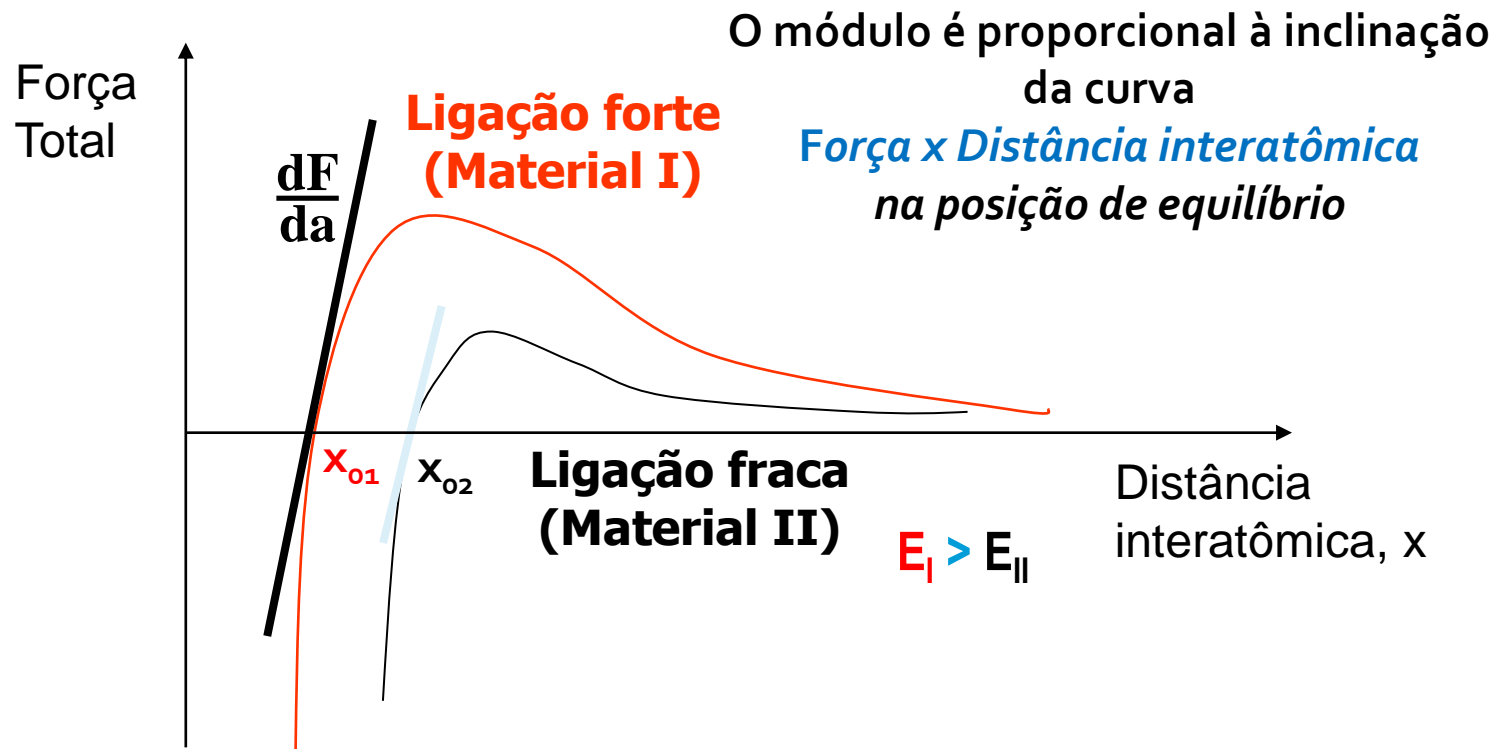
- ✓ É o quociente entre a tensão aplicada e a deformação elástica resultante;
- ✓ Está relacionado com a rigidez do material;
- ✓ Depende fundamentalmente das forças de ligação interatômicas:
  - materiais cerâmicos tem alto módulo de elasticidade
  - materiais poliméricos tem baixo módulo de elasticidade

# Diagrama Tensão x Deformação

## Região Elástica: 1ª REGIÃO DO DIAGRAMA $\sigma \times \varepsilon$



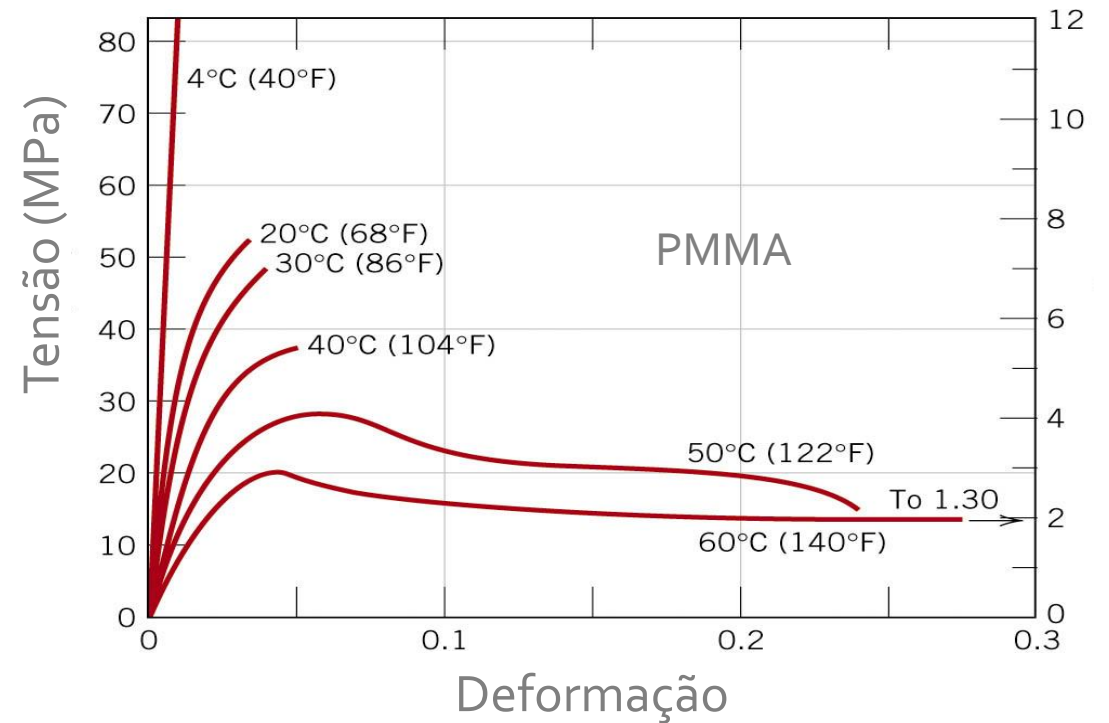
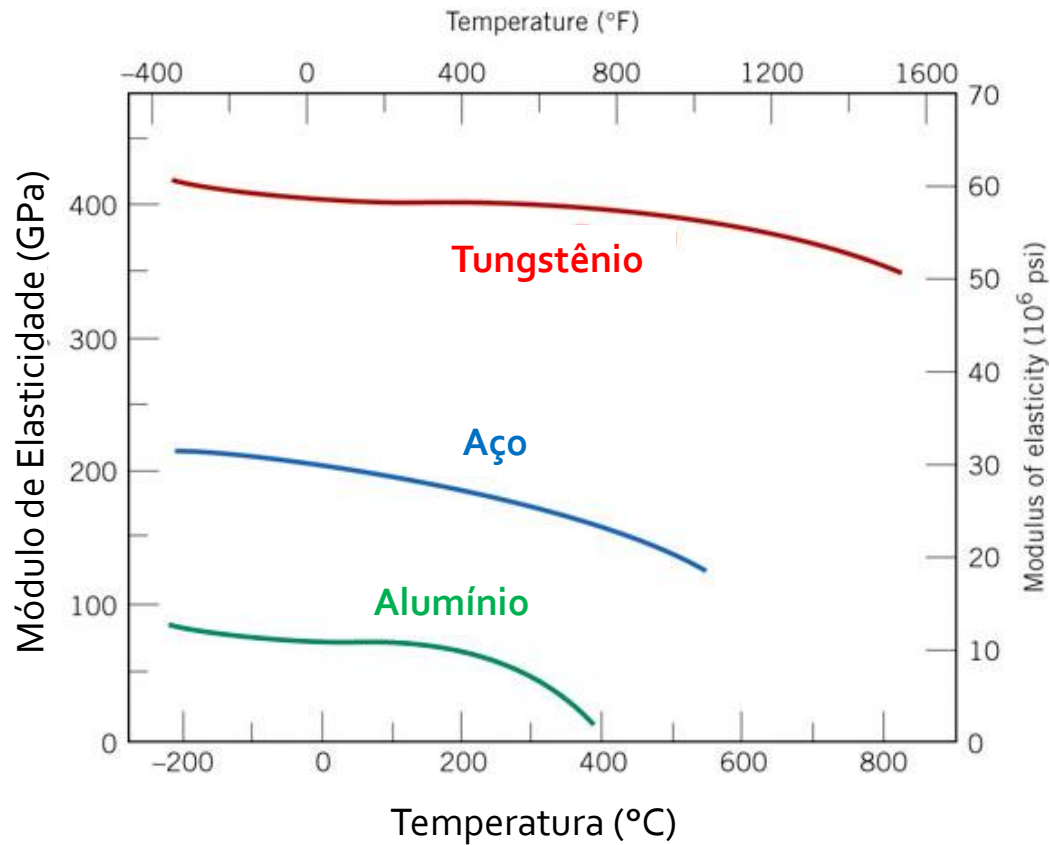
Forças atrativas e repulsivas na ligação entre dois elementos.



Diferentes somatório de forças na ligação entre dois elementos, obtendo-se diferentes módulos de elasticidade.

# Diagrama Tensão x Deformação

## Infuência da temperatura no Módulo de elasticidade



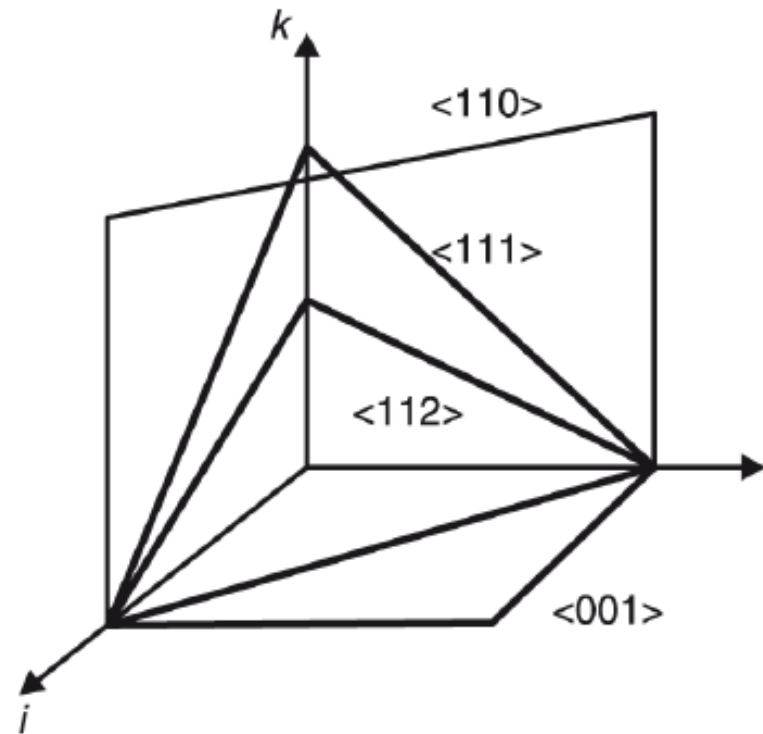
# Diagrama Tensão x Deformação

## Infuência da Estrutura Cristalina no Módulo de elasticidade

### ANISOTROPIA



O módulo de elasticidade depende da direção de aplicação da tensão nos eixos cristalográficos

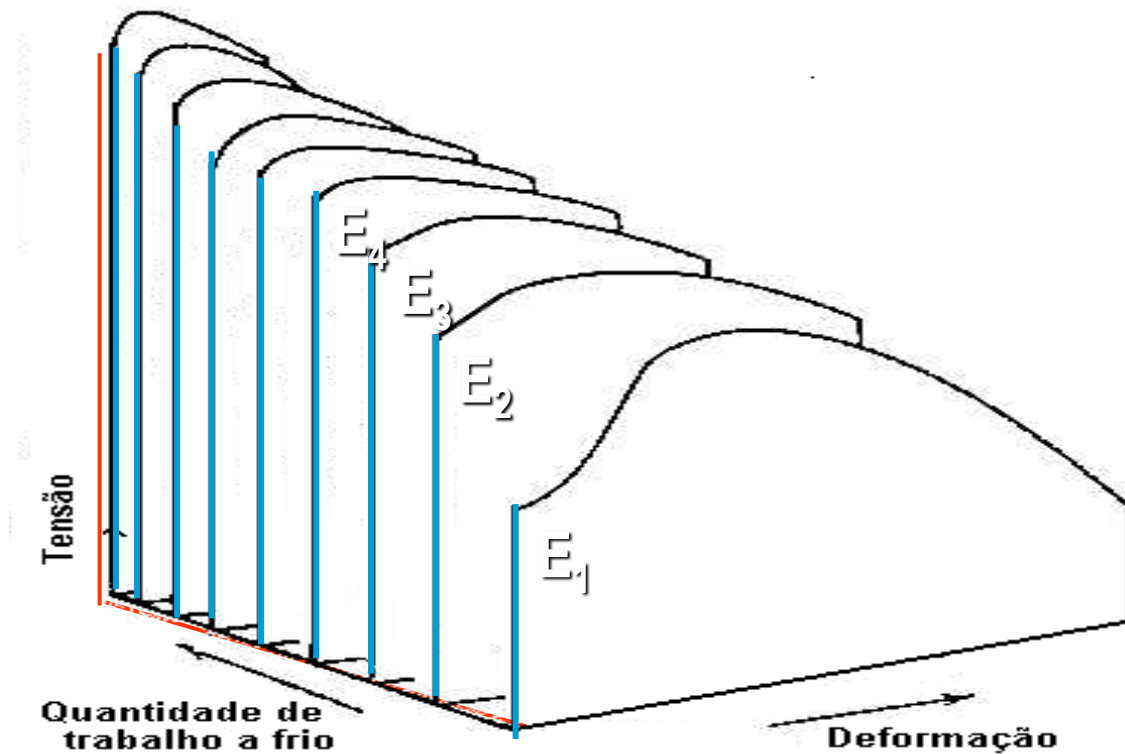


Liga Fe-3%Si	
Plano	$E(\text{GPa})$
$\langle 001 \rangle$	130
$\langle 112 \rangle$	200
$\langle 111 \rangle$	280
$\langle 110 \rangle$	230

# Diagrama Tensão x Deformação

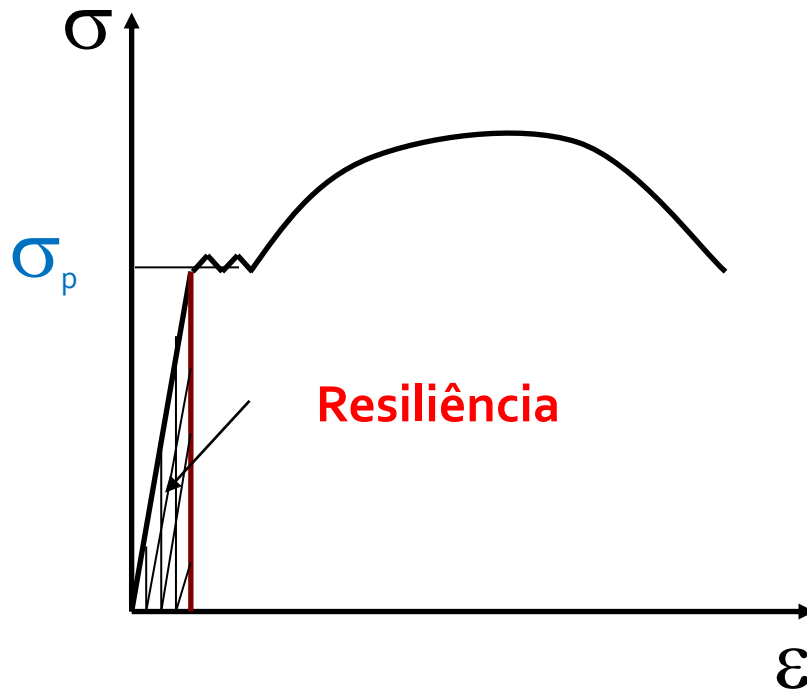
## Relação E com a deformação plástica em metais

Não modifica o módulo de elasticidade (a rigidez) do material  
(apenas a ductilidade)



# Diagrama Tensão x Deformação

## Resiliência



Capacidade do material em absorver energia quando este é deformado elasticamente e liberá-la quando descarregado;

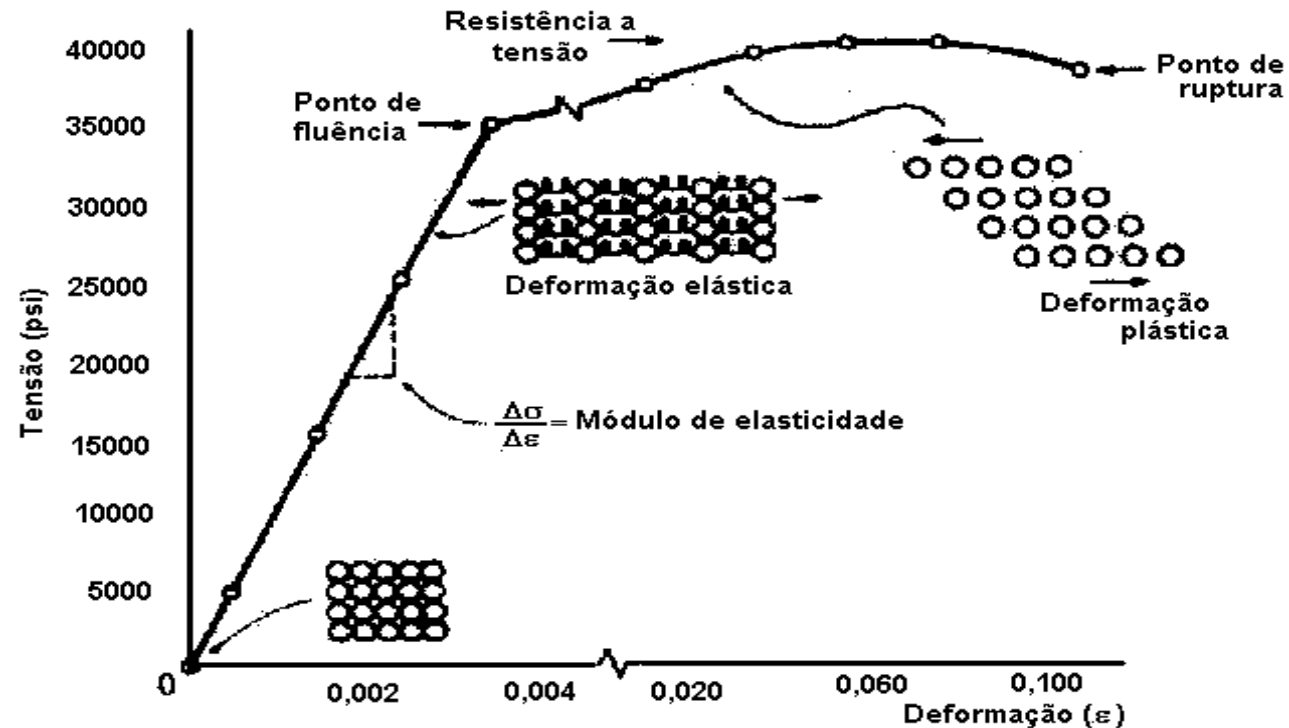
Módulo de Resiliência

$$U_r = \sigma_p^2 / 2E$$

**Materiais resilientes são aqueles que têm alto limite de elasticidade e baixo módulo de elasticidade (como os materiais utilizados para molas)**

# Diagrama Tensão x Deformação

Região de Escoamento – Região de Transição entre as regiões elástica e plástica



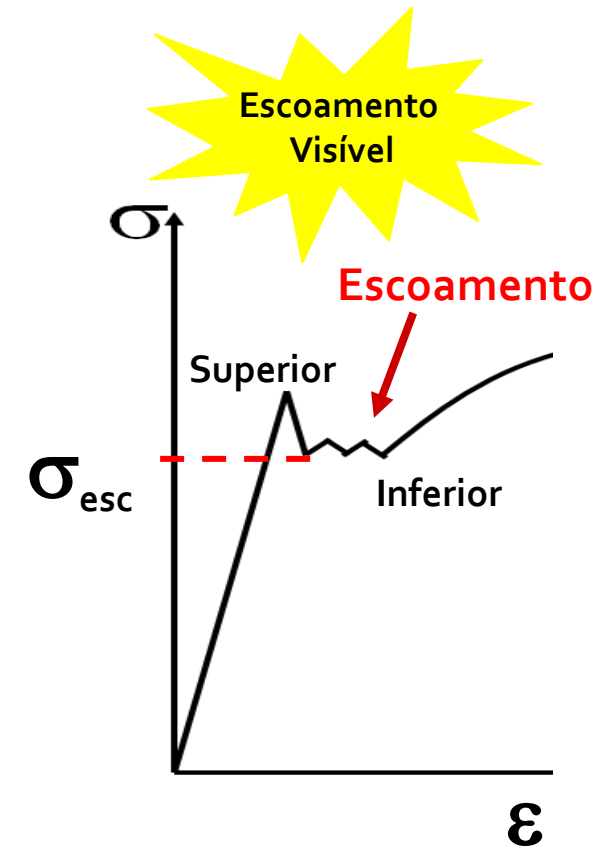
✓ Tensão de Escoamento

Capacidade de um material resistir à deformação plástica

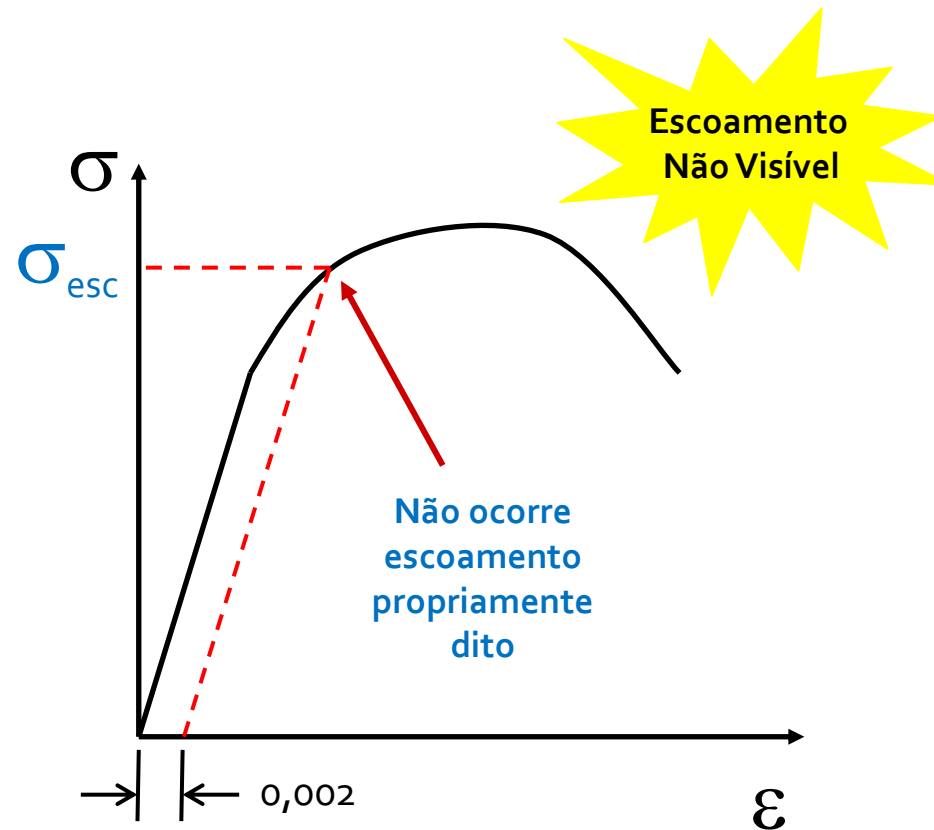


# Diagrama Tensão x Deformação

## Tensão de Escoamento (Kgf/mm<sup>2</sup> ou MPa)



Na curva o limite de escoamento é bem definido (o material escoou, deforma-se plasticamente praticamente sem aumento da tensão).



Na curva, não observa-se nitidamente o fenômeno de escoamento, a tensão de escoamento corresponde à tensão necessária para promover uma deformação permanente de n%.

Na prática o valor de n é igual a:

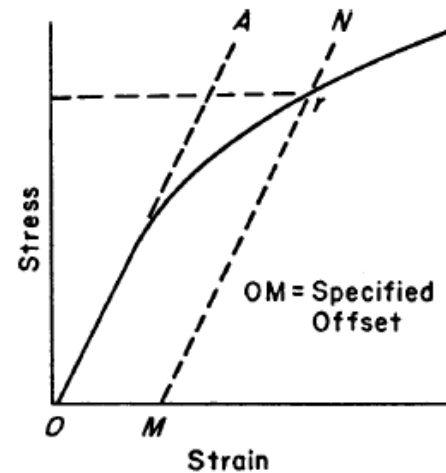
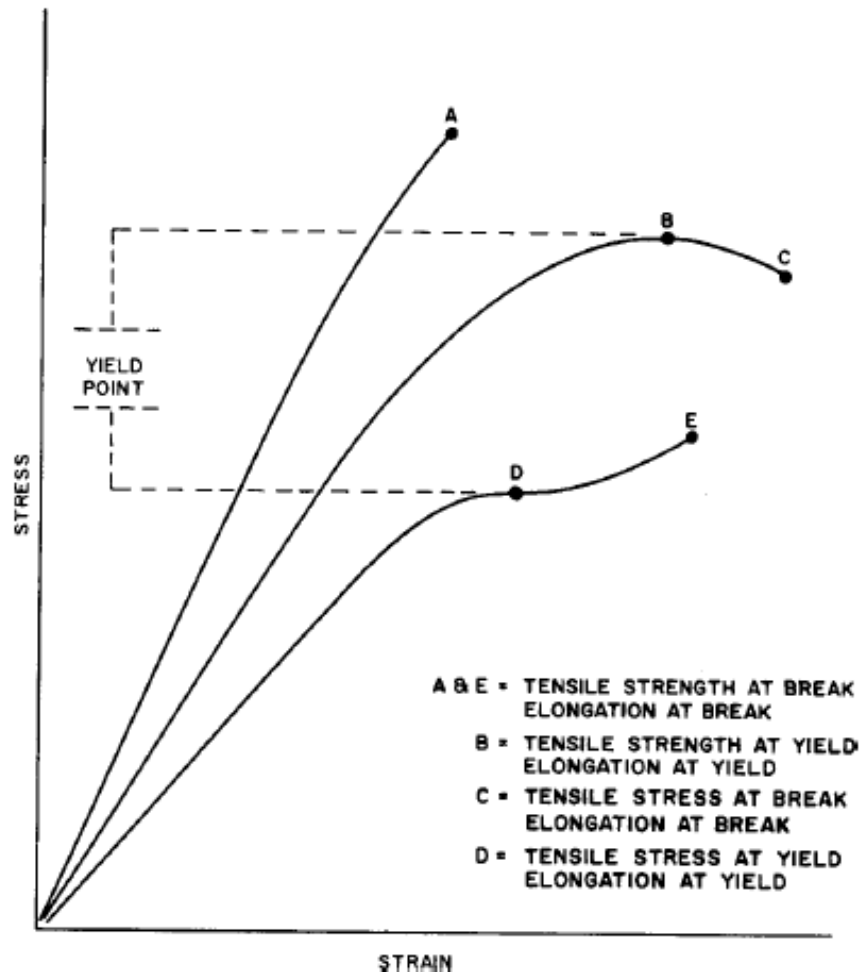
0,2% ( $\epsilon=0,002$ ) – metais e suas ligas

0,5% ( $\epsilon=0,005$ ) – cobre e suas ligas

0,1% ( $\epsilon=0,001$ ) – ligas metálicas muito duras

# Diagrama Tensão x Deformação

## Tensão de Escoamento (Kgf/mm<sup>2</sup> ou MPa) para polímeros



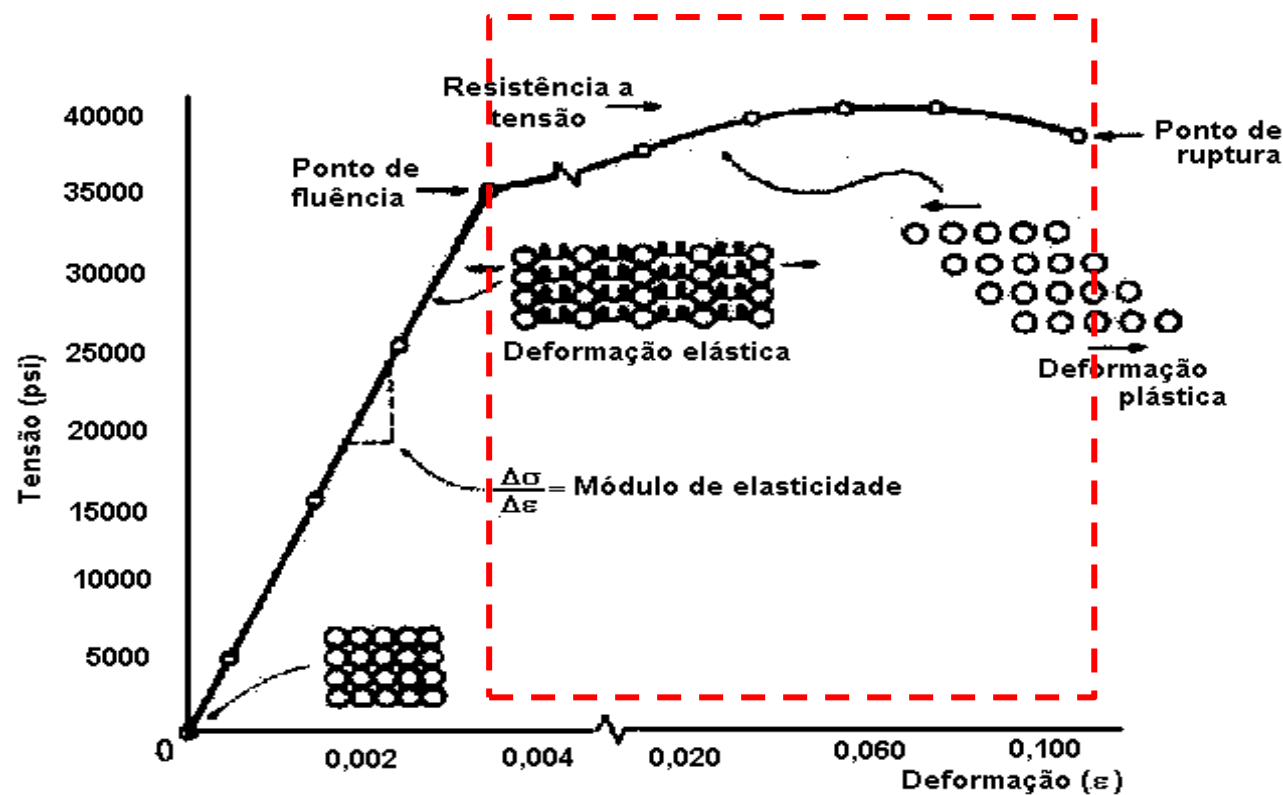
### ASTM D638

**Ponto de Escoamento** - primeiro ponto da curva *Tensão x Deformação* na qual ocorre um aumento da deformação sem aumento de tensão

**Tensão de escoamento** – tensão na qual existe um desvio da proporcionalidade entre Tensão x Deformação ou a tensão no ponto de escoamento

# Diagrama Tensão x Deformação

## Região Plástica: 2ª REGIÃO DO DIAGRAMA $\sigma \times \varepsilon$



✓ Deformação plástica;

✓ Resistência à tração;

✓ Tensão de Ruptura

✓ Ductilidade;

# Diagrama Tensão x Deformação

## Encruamento

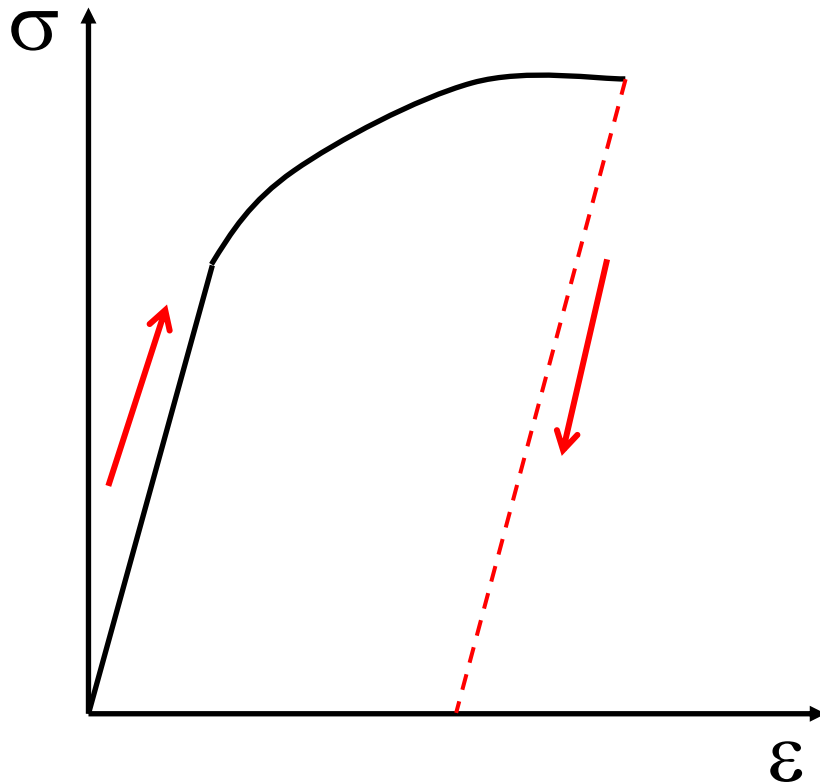
O aumento de tensão para dar continuidade à deformação plástica ocorre devido ao fenômeno de encruamento;

A partir do escoamento o material começa a se deformar plasticamente, onde ocorre o endurecimento por deformação a frio, **região de encruamento uniforme**.

Após a tensão máxima devido ao fenômeno da estricção tem-se a região de **encruamento não-uniforme**

# Diagrama Tensão x Deformação

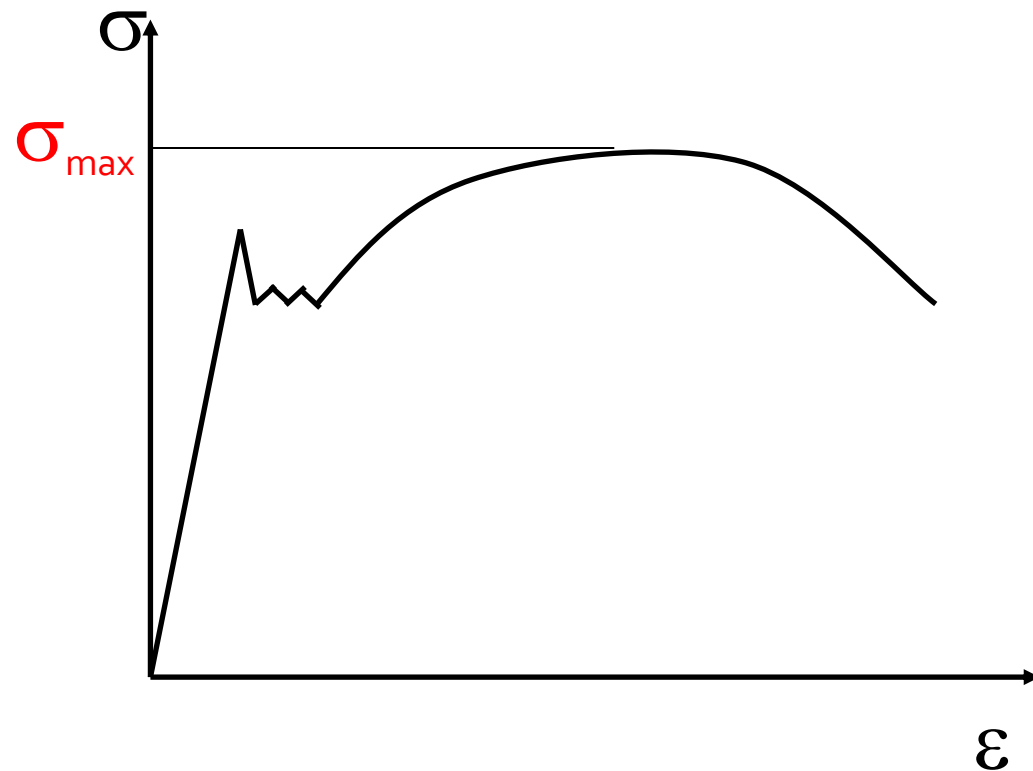
## Deformação Plástica



- ✓ É provocada por tensões que **ultrapassam o limite de elasticidade**;
- ✓ É irreversível porque é resultado do **deslocamento permanente dos átomos** e, portanto não desaparece quando a tensão é removida

# Diagrama Tensão x Deformação

Tensão Máxima – Resistência à tração (Kgf/mm<sup>2</sup> ou Mpa)

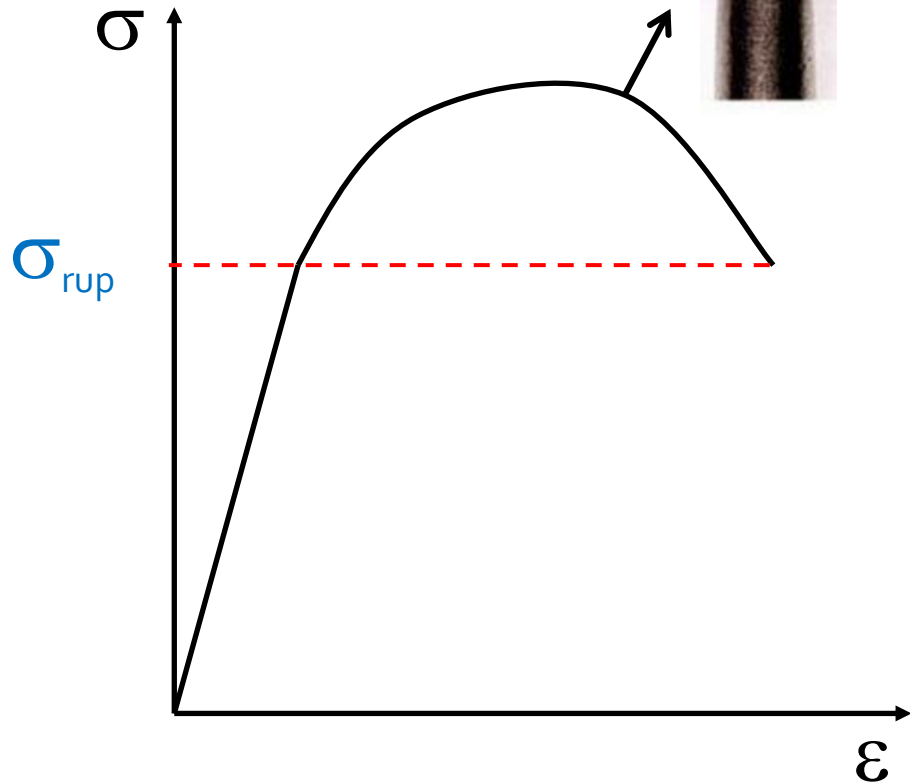


- ✓ Corresponde à tensão máxima aplicada ao material antes da ruptura (muitas vezes é superior à tensão de ruptura);
- ✓ Cálculo: divide-se a carga máxima suportada pelo material pela área de seção reta inicial

$$\sigma = F_{\max} / A_0$$

# Diagrama Tensão x Deformação

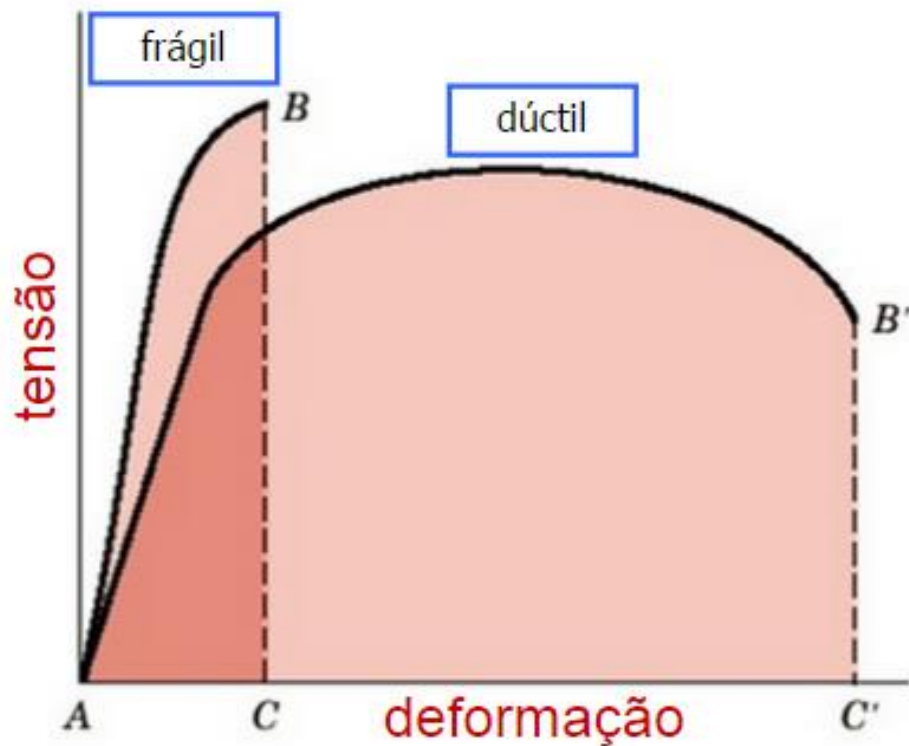
Tensão de Ruptura (Kgf/mm<sup>2</sup> ou Mpa)



- ✓ Corresponde à tensão que provoca a ruptura do material
- ✓ O limite de ruptura é geralmente inferior ao limite de resistência em virtude de que a área da seção reta para um material dúctil reduz-se antes da ruptura

# Diagrama Tensão x Deformação

## Ductilidade

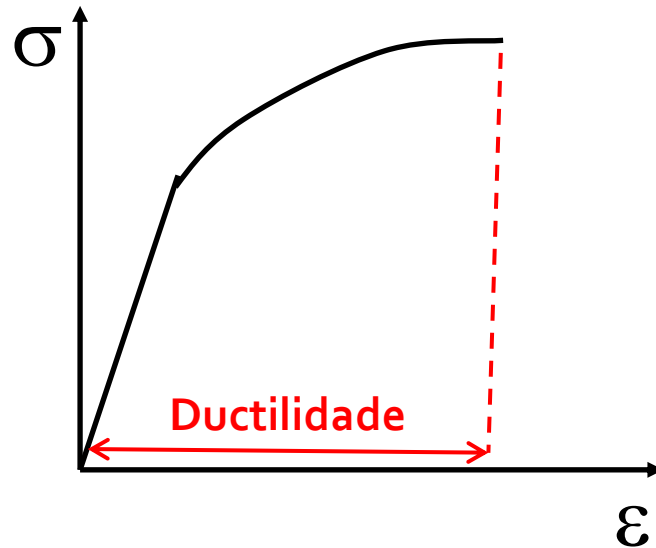


- ✓ Ductilidade é grau de deformação plástica que foi suportado até a fratura;
- ✓ Pode ser medido pelo alongamento percentual ou pela redução de área



# Diagrama Tensão x Deformação

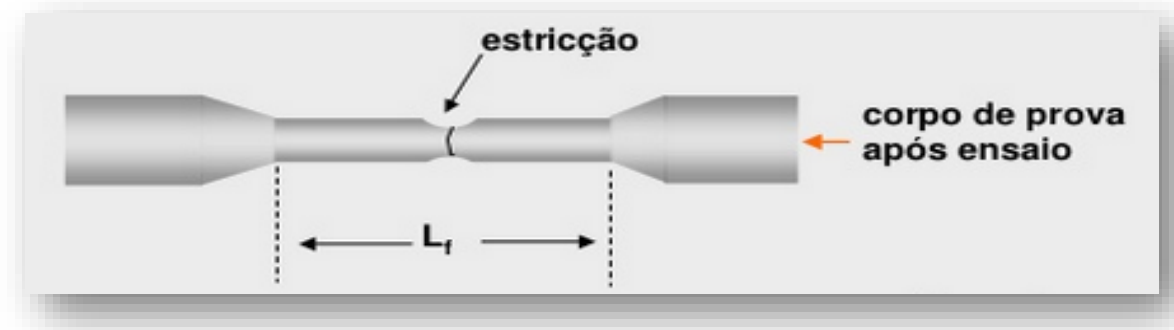
## Ductilidade



Corresponde ao alongamento total do material devido à deformação plástica

$$\varepsilon \% = ((l_f - l_o) / l_o) \times 100$$

$l_o$ : comprimento inicial util do cdp  
 $l_f$ : comprimento final após a ruptura



Redução de área ou coeficiente de estrição:

$$RA \% = (A_o - A_f) / A_o \times 100$$

$A_o$ : área inicial util do cdp  
 $A_f$ : área final após a ruptura

# Diagrama Tensão x Deformação

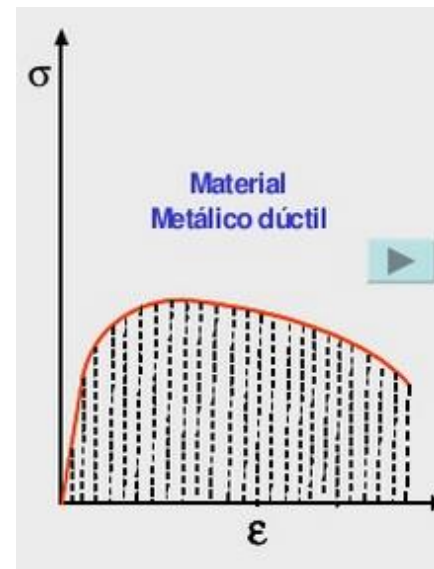
## Tenacidade

Corresponde à capacidade do material em absorver energia até sua ruptura.

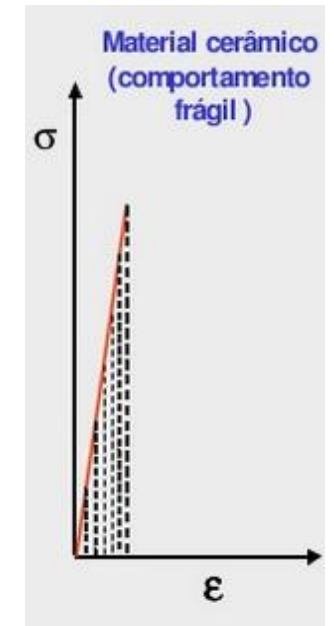


**Tenacidade**

A medida desta propriedade é dada pelo módulo de tenacidade ( $U_t$ )



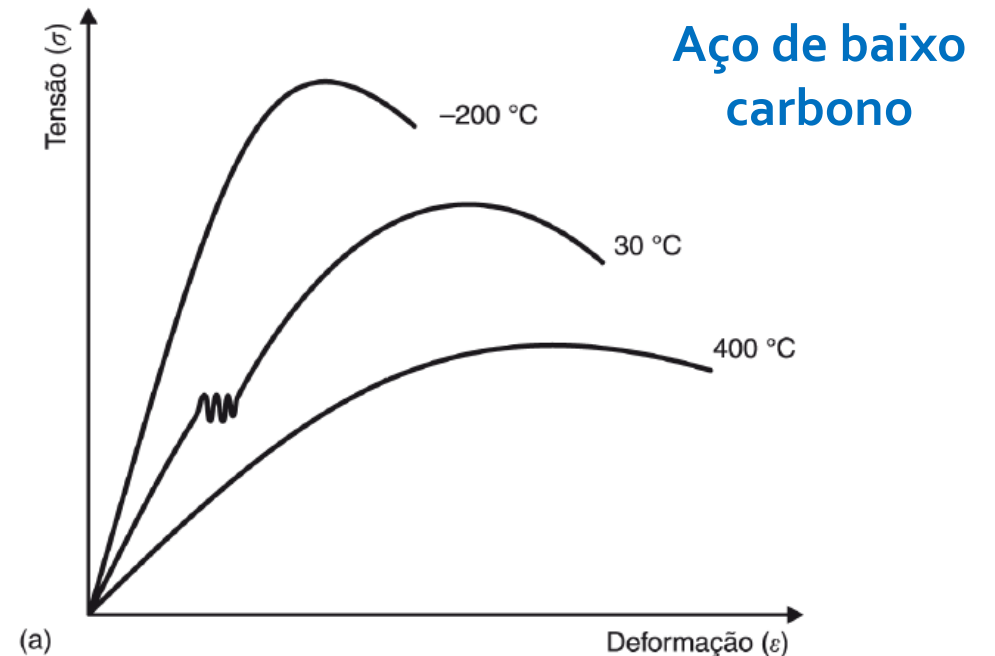
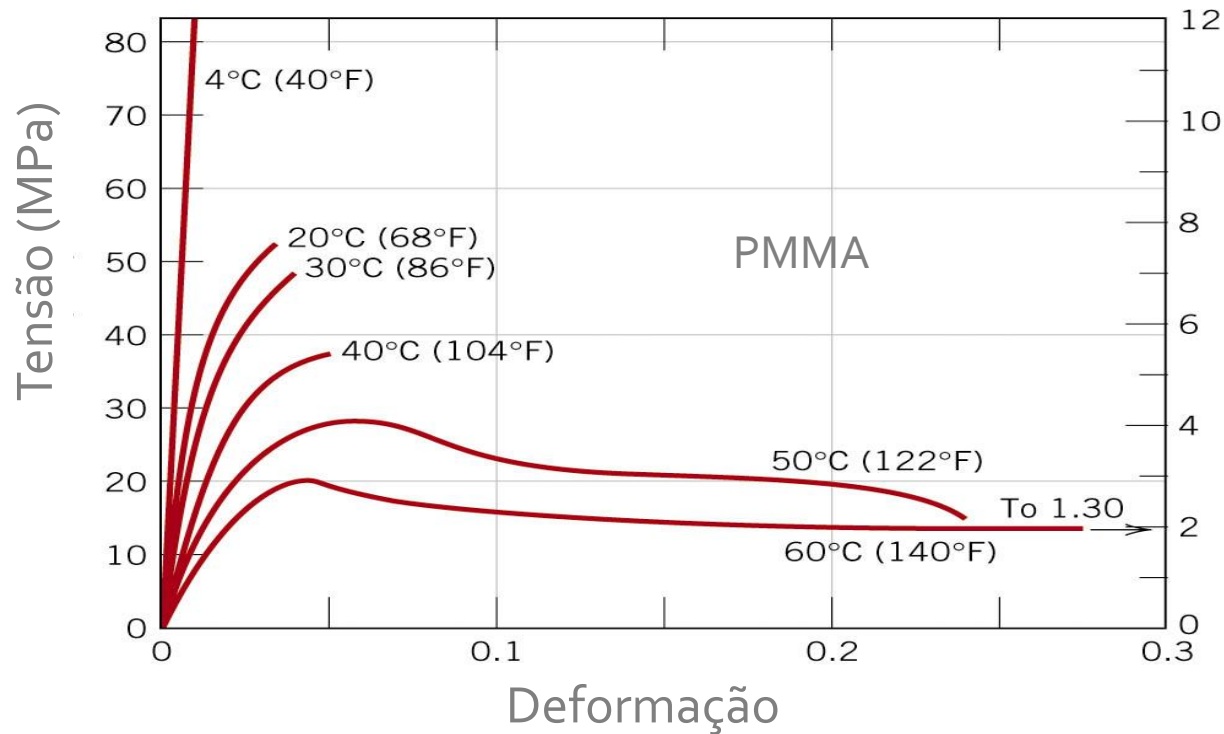
$$U_t = (\sigma_e + \sigma_{\max} / 2) \epsilon_f$$



$$U_t = 2/3(\sigma_{\text{esc}} \epsilon_f)$$

# Diagrama Tensão x Deformação

## Efeito da temperatura de execução do Ensaio

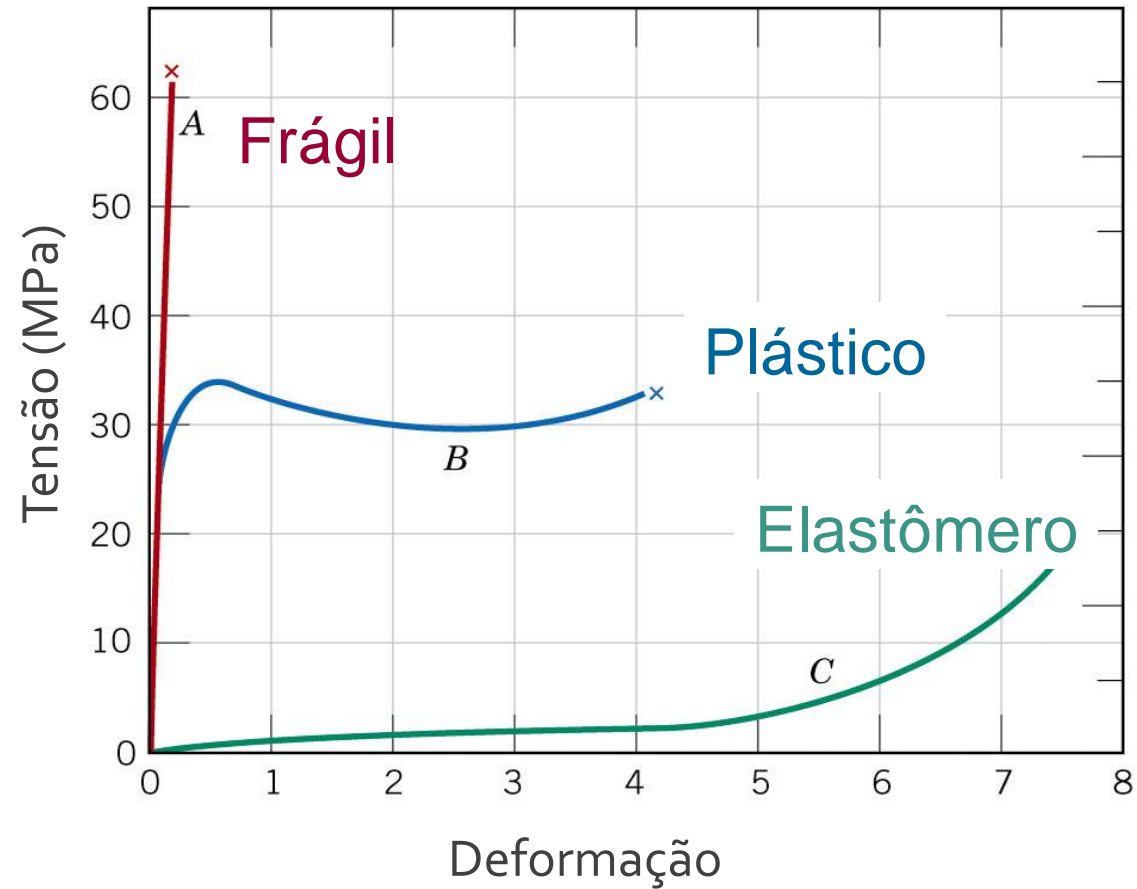


↑ temperatura ↓ resistência e módulo

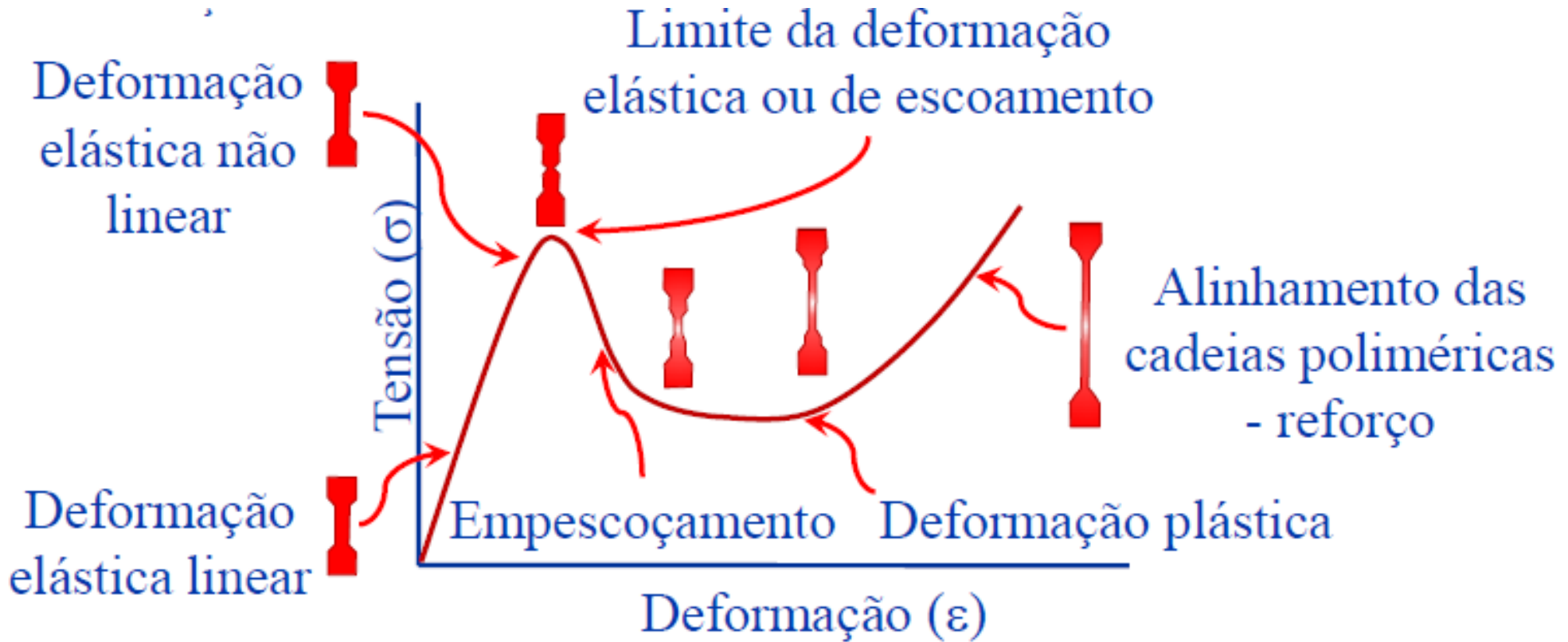
↑ temperatura ↑ alongamento

# Diagrama Tensão x Deformação

## Curvas $\sigma \times \varepsilon$ de alguns polímeros



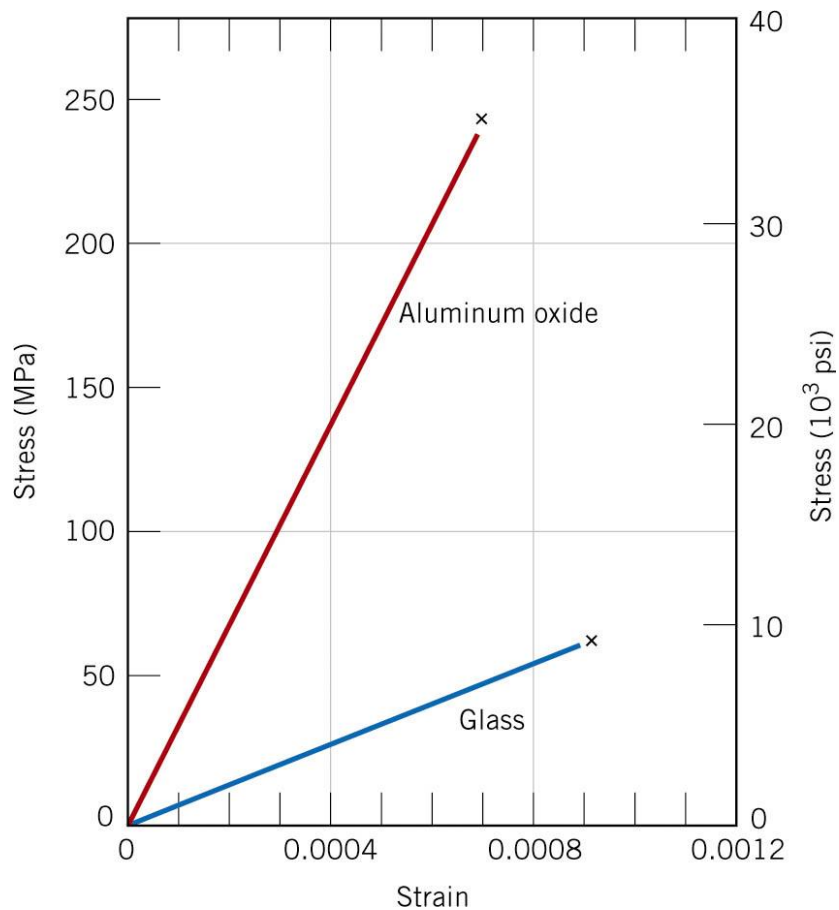
# Diagrama Tensão x Deformação







# Diagrama Tensão x Deformação



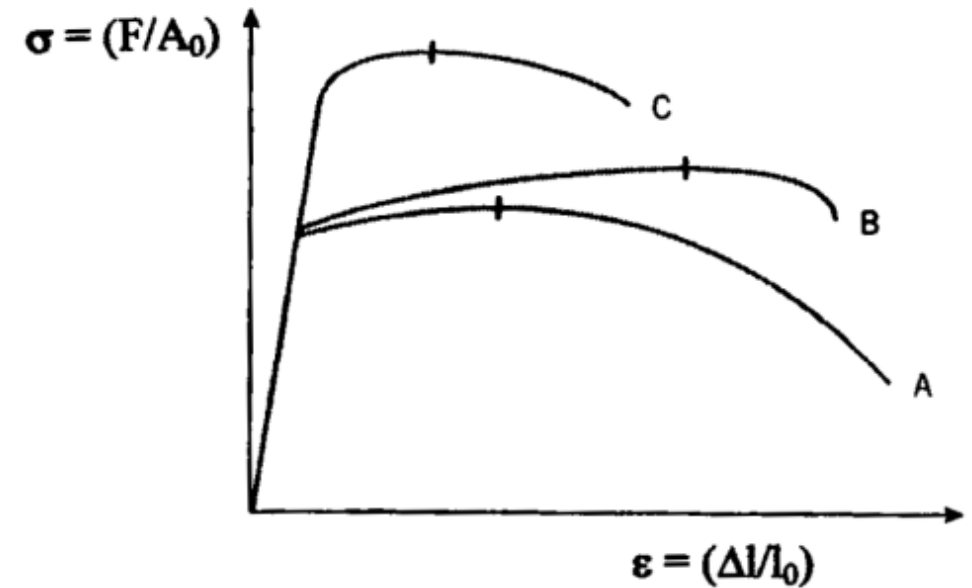
O comportamento de Tensão x Deformação de cerâmicas frágeis normalmente **não é avaliado por tração** pois:

- ✓ Dificuldade de preparar e testar amostras com a geometria necessária;
- ✓ Dificuldade em fixar as amostras sem fraturar;
- ✓ Cerâmicas são mais resistentes em compressão do que em tração devido a presença de trincas
- ✓ A deformação antes da ruptura é de apenas 0,1%.



# Tarefa

Considere as curvas tensão de engenharia *versus* deformação de engenharia para os três materiais (**A**, **B** e **C**) e responda as afirmativas com falso (**F**) ou verdadeiro (**V**).



- a) Os três materiais têm módulos de elasticidade idênticos. ( )
- b) Os três materiais apresentam módulos de resiliência idênticos. ( )
- c) O material **C** apresenta maior limite de escoamento do que **A** ou **B**. ( )
- d) O material **C** apresenta maior limite de resistência do que **A** ou **B**. ( )
- e) O material **A** apresenta maior alongamento total (ductilidade) do que **B**. ( )
- f) O material **B** tem provavelmente maior tenacidade do que **C**. ( )
- g) O material **C** é provavelmente mais duro do que **A**. ( )
- h) Os três materiais (**A**, **B** e **C**) são provavelmente materiais cerâmicos. ( )

# REFERÊNCIAS E BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- CALLISTER JR., W. D; RETHWISCH, D.G.. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Um introdução**, 8ª ed, Rio de Janeiro: LTC, 2015.
- CALLISTER JR, W.D. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 7 th Ed. Wiley.
- GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos Materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2000.
- SOUZA, S. A. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos**. Fundamentos teóricos e práticos. 5 ed., São Paulo: Edgard Blucher, 1982.



***Muito  
obrigada!***

# LOM3016 – Introdução à Ciência dos Materiais



## Aula 8 – Propriedades Mecânicas dos Materiais – Parte 3

Kelly Benini



# Classificação dos Ensaios Mecânicos

## Quanto à integridade

- **Destrutivos**: provocam inutilização parcial ou total da peça. Ex.: Tração, Fadiga, Fluência, Impacto, Torção, Flexão, Tenacidade à fratura
- **Não destrutivos**: não comprometem a integridade da peça. Ex.: Raios-X, Ultra-som, Líquidos penetrantes, Microdureza

## Quanto à velocidade

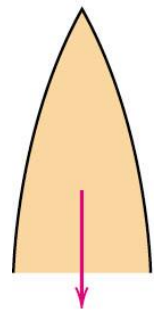
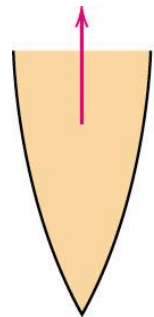
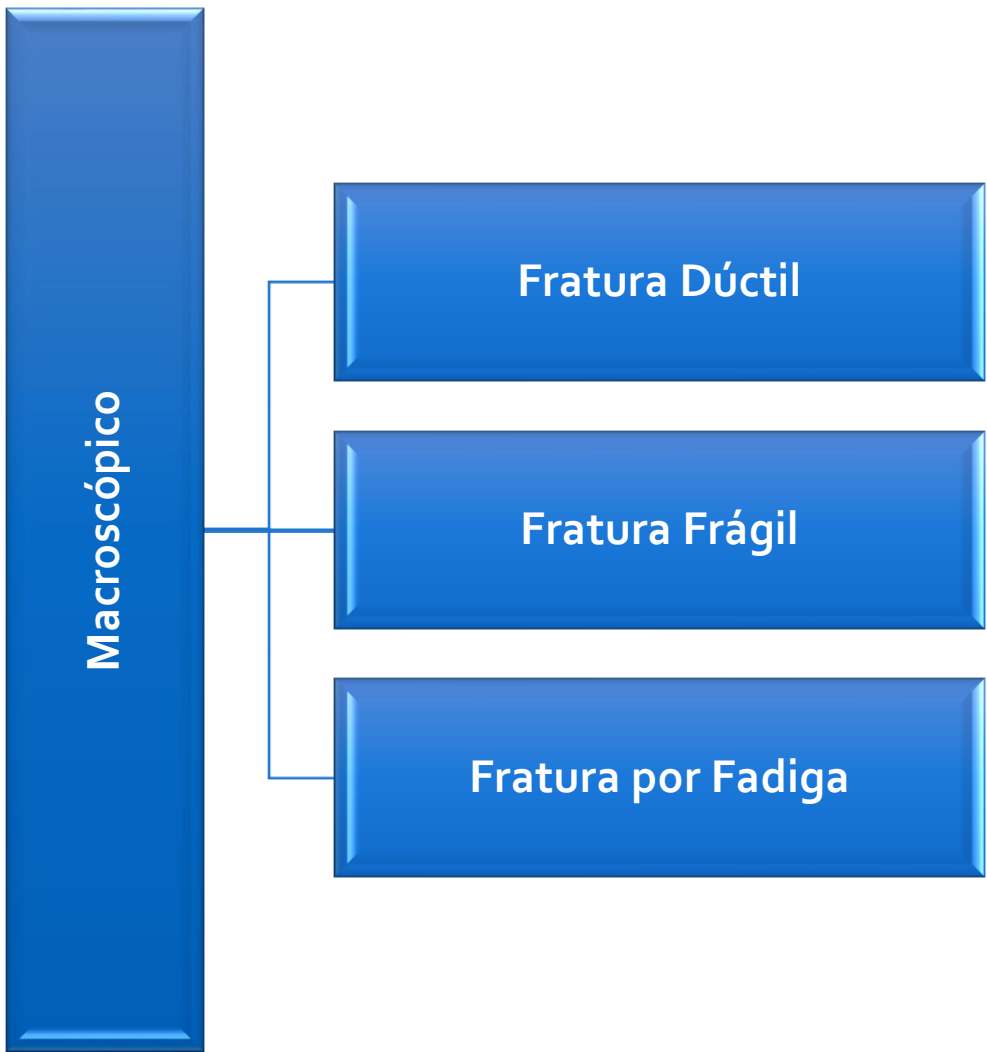
- **Estáticos**: carga aplicada lentamente (estado de equilíbrio). Ex.: Tração, Compressão, Flexão, Dureza e Torção
- **Dinâmicos**: carga aplicada rapidamente ou ciclicamente. Ex.: Fadiga e Impacto
- **Carga constante**: carga aplicada durante um longo período de tempo. Ex.: Fluência

# Efeito do Tempo e da Temperatura

## Curvas de TENSÃO-DEFORMAÇÃO

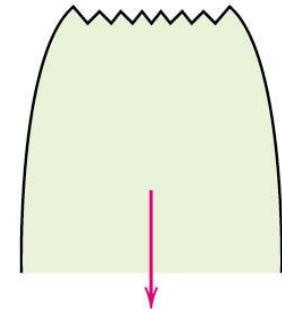
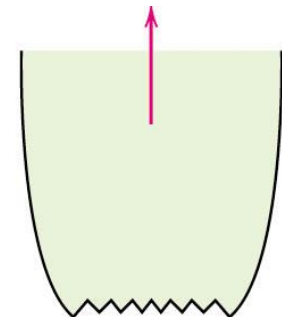
- ✓ Obtidas numa máquina universal de ensaios mecânicos
- ✓ São muito úteis mas simplificadas quando comparadas às solicitações reais de um dado equipamento ou componente
- ✓ São considerados "estáticos", carga aplicada lentamente e num curto período de tempo.
- ✓ Não reproduzem todo o universo das solicitações que os materiais podem estar envolvidos em seu serviço
- ✓ **Não mostram a influência do tempo (taxa de deformação, esforços cíclicos) no comportamento do material na região elástica, importante para entender o desempenho do material em serviço.**

# Tipos de Fratura



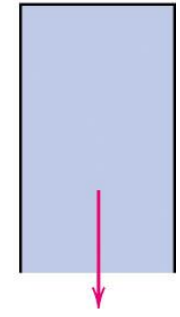
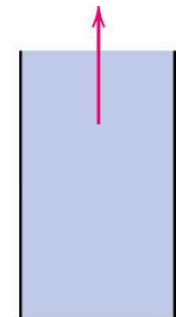
(a)

Dúctil



(b)

Intermediária



(c)

Frágil

# Tipos de Fratura

## Fratura Dúctil

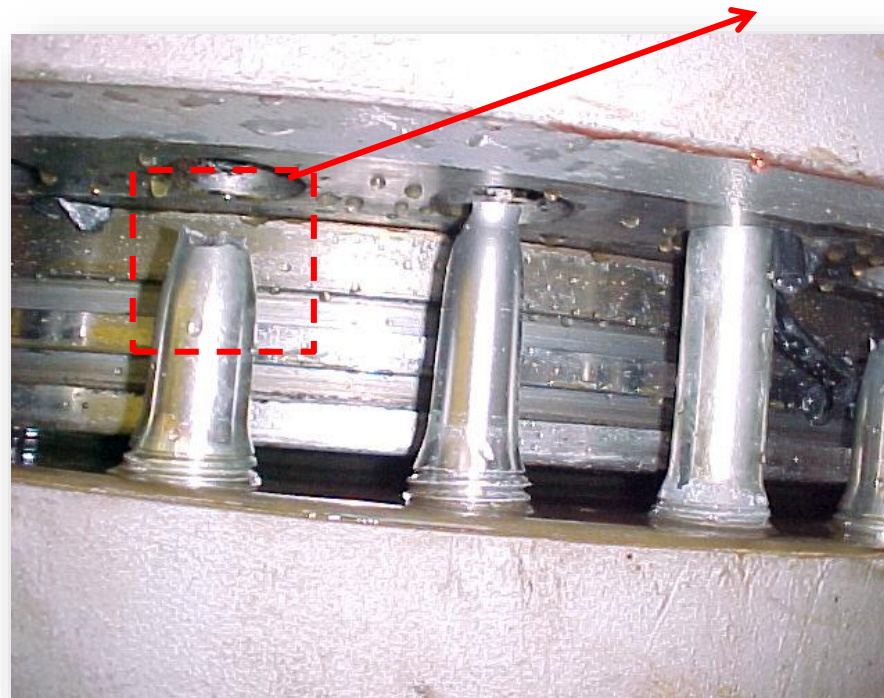
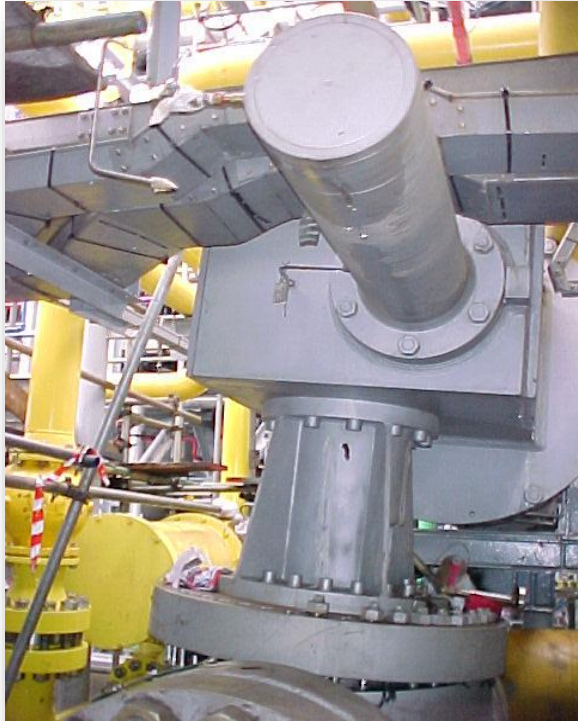
### Características:

- ✓ *Deformação plástica intensa;*
- ✓ *Grande quantidade de energia consumida para provocar a fratura;*
- ✓ *Característica de materiais tenazes;*
- ✓ *Verifica-se a estrição do corpo de prova;*
- ✓ *Aspecto rugoso e fosco da superfície da fratura.*





## Fratura Dúctil - Exemplo



Grande deformação plástica



# Tipos de Fratura

## Fratura Frágil



### Características:

- ✓ Pouca deformação plástica anterior à fratura;
- ✓ Baixa energia para rompimento das ligações metálicas;
- ✓ Característica de materiais com baixa tenacidade;
- ✓ Formação de superfícies lisas ou planas com aspecto brilhante.



# Tipos de Fratura

## Fratura Frágil - Exemplo



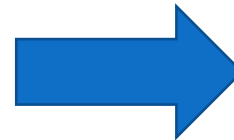
# Fratura Frágil

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.



Fatores que contribuem para a ocorrência de **Fratura Frágil**

- ✓ Presença de trincas, pois produz um estado triaxial de tensões;
- ✓ Baixa temperatura;
- ✓ Alta velocidade de deformação ou de carregamento;



- ✓ Ensaio de Impacto
- ✓ Fadiga

# Ensaio de Impacto

- ✓ Mede a tendência de um material em se comportar de maneira frágil;
- ✓ Um dos ensaios mais empregados do estudo de fratura frágil;
  - ✓ Um corpo de prova com entalhe é submetido a um esforço de flexão por impacto;
  - ✓ Medida da energia absorvida.

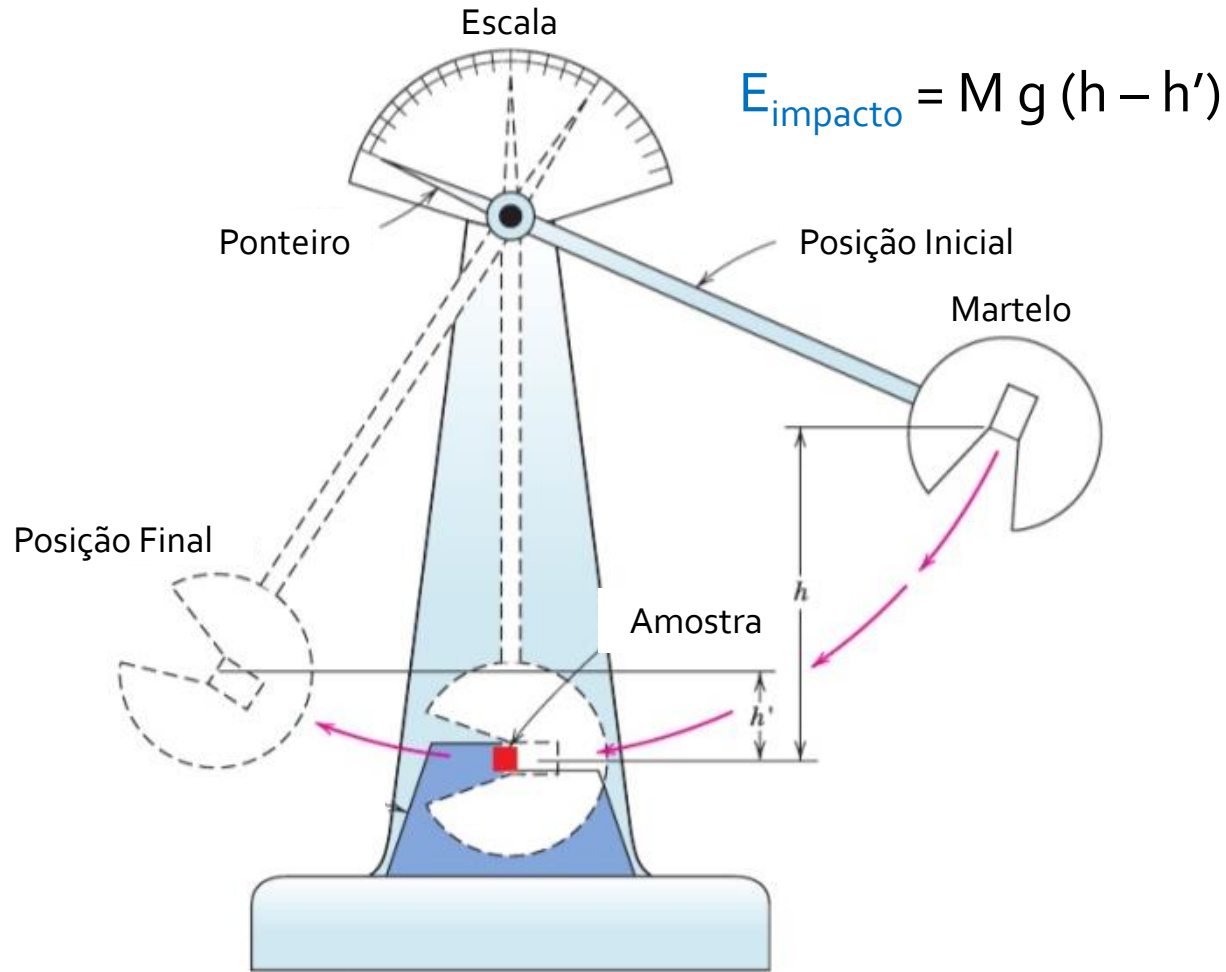
*O ensaio de impacto leva em conta principalmente a energia envolvida na fratura.*

*Esta energia é absorvida de diversas formas:*

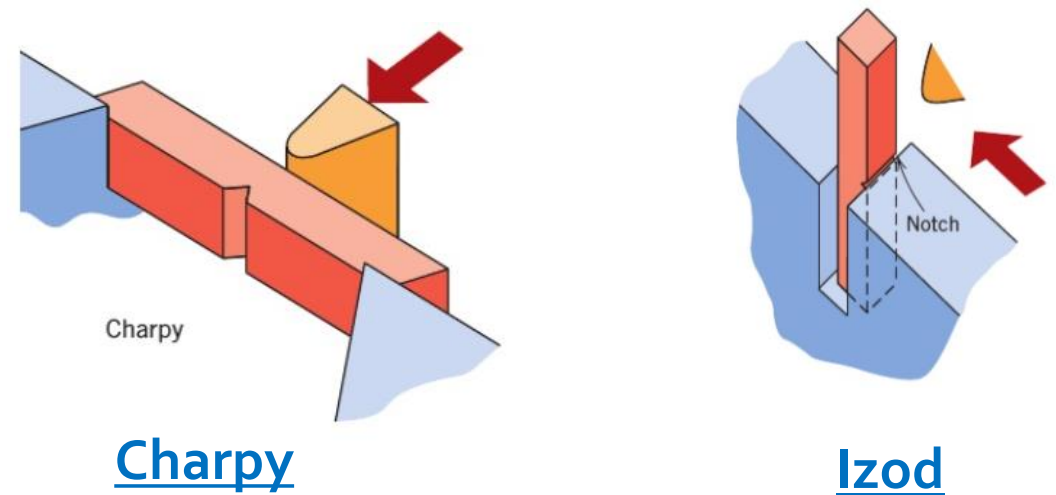
- ✓ **Deformações elásticas**
- ✓ **Deformações plásticas**
  - ✓ **Atritos externos**
- ✓ **Inércia de partes móveis**

*No projeto de componentes sujeitos a cargas de impacto deve-se procurar efetuar a absorção de energia ao máximo através de deformações elásticas.*

# Ensaio de Impacto



Existem duas classes de corpos de prova entalhados para ensaio de impacto normalizados



- ✓ Charpy é mais indicado para ensaios em temperaturas diferentes da ambiente;
- ✓ A necessidade de prender o CDP entre duas garras (Izod) pode induzir algumas tensões.

# Ensaio de Impacto – Fratura

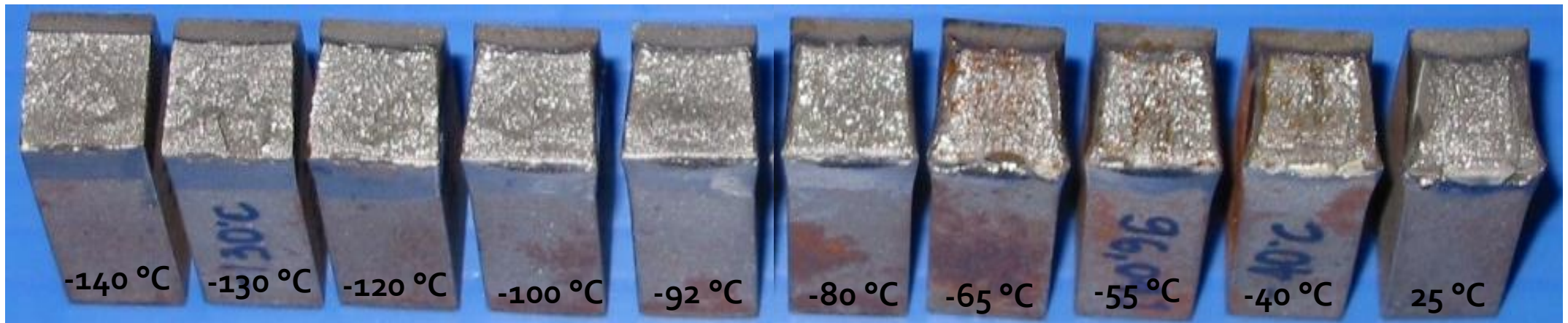
## Informações obtidas:

**Energia absorvida:** medida diretamente pela máquina;

**Contração lateral:** quantidade de contração em cada lado do corpo de prova;

**Aparência da Fratura:** determinação da porcentagem de fratura frágil;

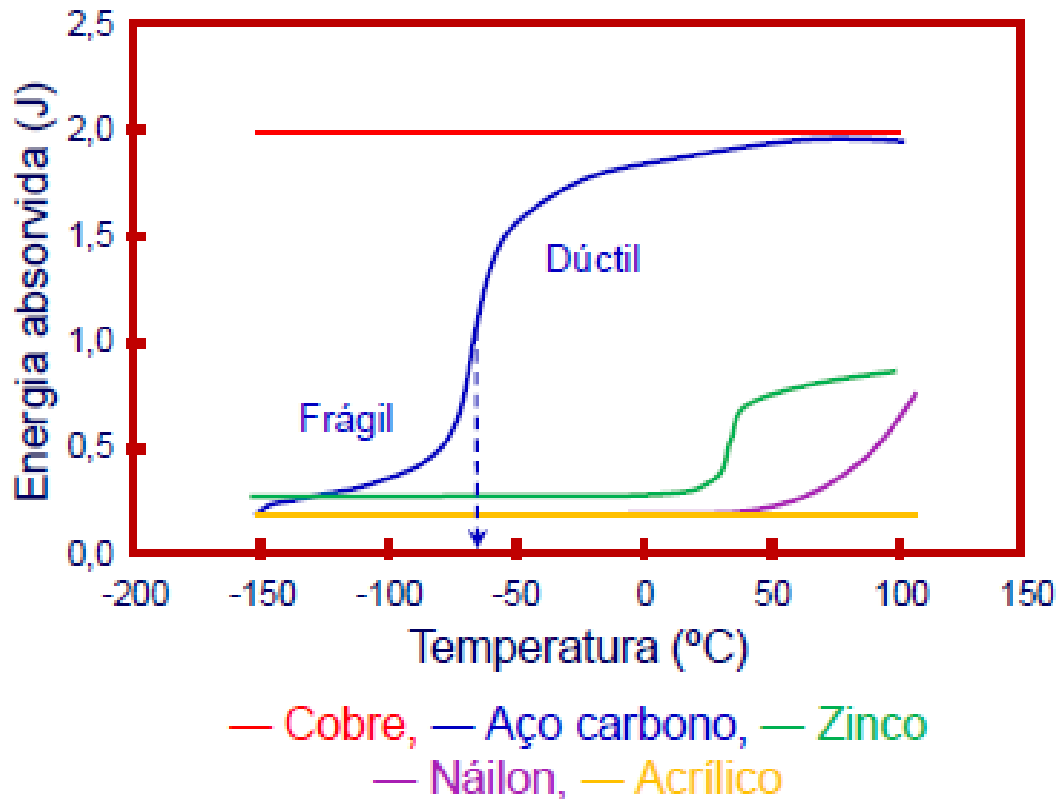
**Temperatura de Transição dúctil-frágil:** faixa de temperatura na qual ocorre uma mudança no tipo de fratura do material.



**Alguns aspectos da fratura em impacto**

# Temperatura de Transição dúctil-frágil

A temperatura de transição corresponde a uma alteração do comportamento do material quanto a sua forma de fratura.

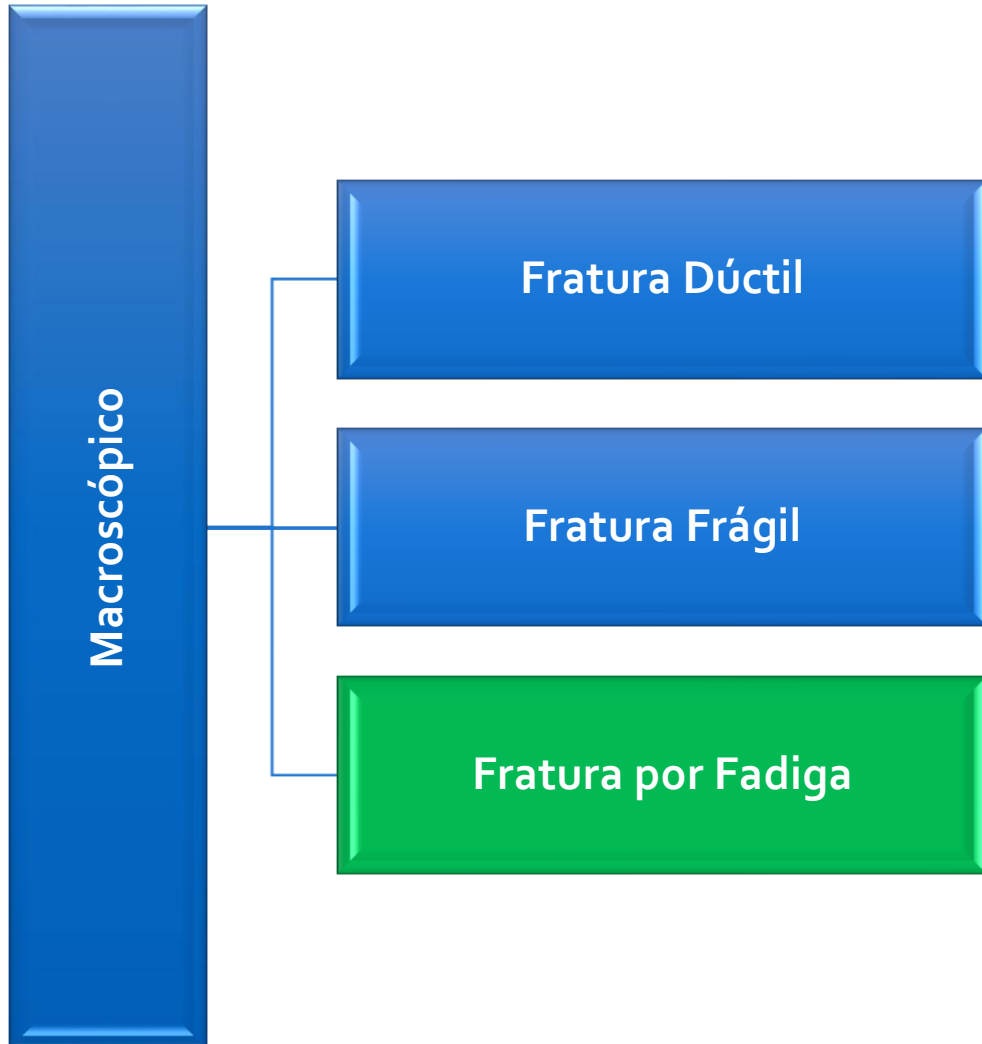


- ✓ Nos metais está associada à imobilização de discordâncias devido à baixa temperatura (difusão)
- ✓ Nem todos os materiais apresentam uma transição dúctil-frágil acentuada;
- ✓ Pode ser observada em metais CCC e HC e em cerâmicas (em temperaturas elevadas).
- ✓ Para polímeros está associada à presença de reticulação e  $T_g$ , ou seja, à mobilidade da cadeia polimérica em função da temperatura.

Fonte: Slides de aula – PMT3100 Fundamentos de Ciência e Engenharia dos Materiais EPUSP - 2014



# Tipos de Fratura



Componentes de máquinas, veículos e estruturas estão freqüentemente sujeitos a carregamentos repetitivos durante sua vida em serviço.



**Carregamentos Cíclicos**



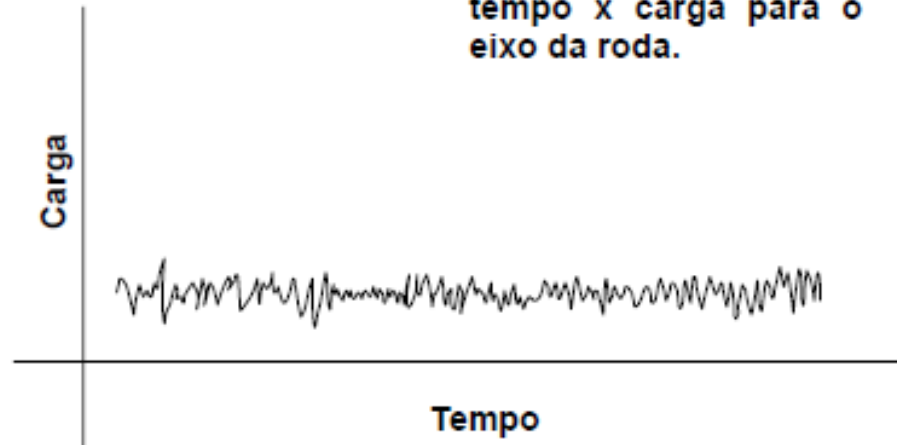
A fratura poderá ocorrer com uma **tensão muito inferior** àquela necessária para produzir uma falha devido à aplicação de uma carga estática.

# Carregamento Cíclico

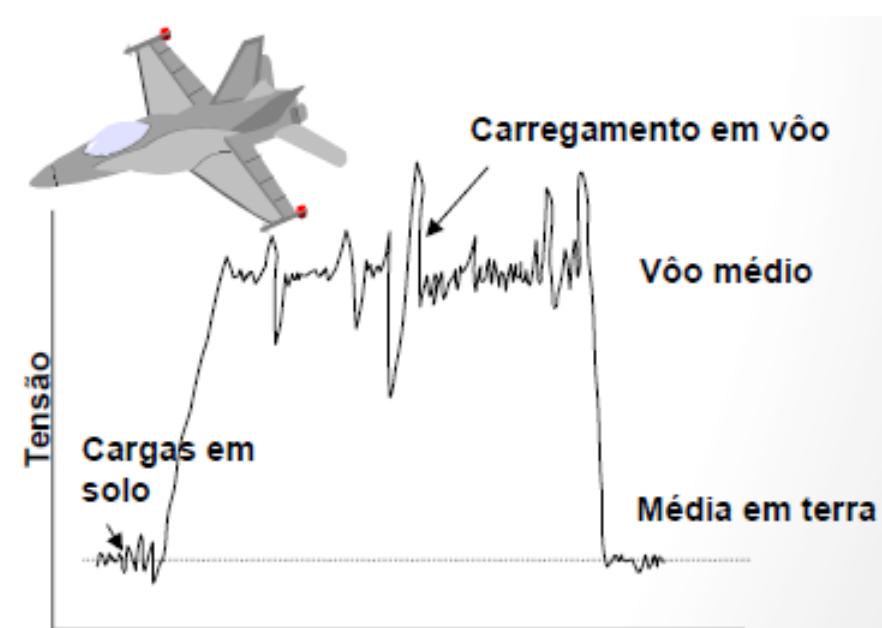
Em situações reais as **intensidades** e as **freqüências** com que a carga varia entre um valor máximo e mínimo é totalmente aleatória



Típica história de tempo x carga para o eixo da roda.

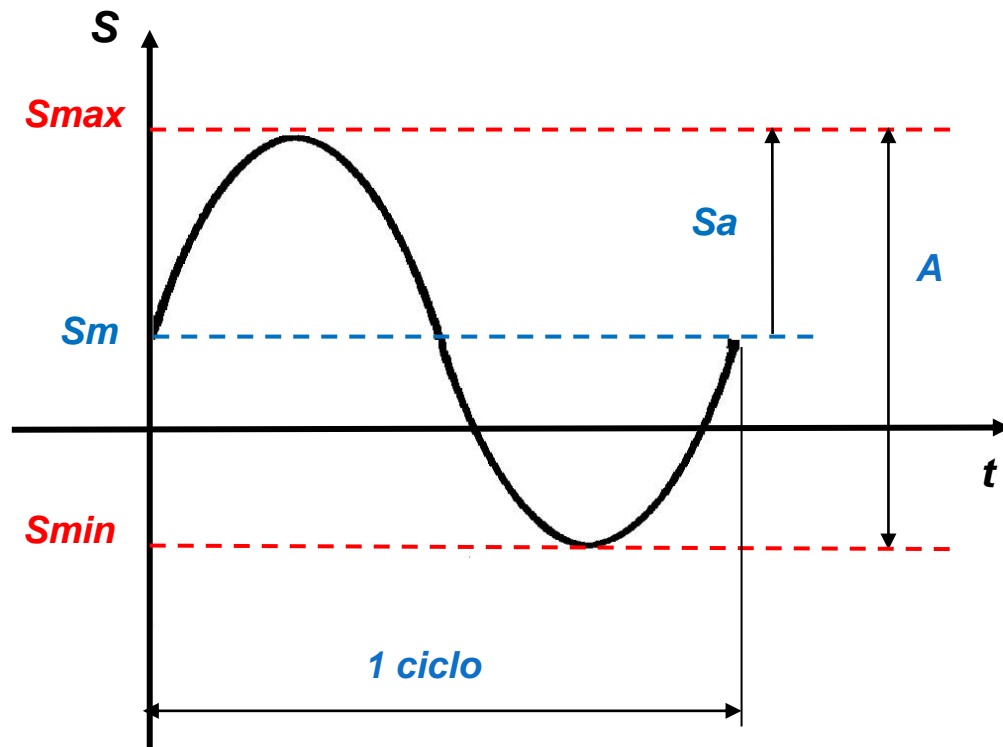


- ✓ Ciclo de tensões aleatórias – a amplitude e a frequência podem variar aleatoriamente.



# Carregamento Cíclico

Em laboratório normalmente se considera ciclos de tensões alternadas de **forma senoidal**



$S_{\max}$  - Tensão máxima do ciclo

$S_{\min}$  - Tensão mínima do ciclo

$S_m$  - Tensão média do ciclo

$S_a$  - Tensão variável ou alternada do ciclo

$A$  - Amplitude de tensões;

✓ **Ciclo de tensões Reverso (alternadas simétricas)** – a tensão varia no tempo senoidal,  $\sigma_{\max}$  e  $\sigma_{\min}$  são iguais em módulo ( $R=-1$ )

✓ **Ciclo de tensões repetidas** – neste tipo os valores de  $\sigma_{\max}$  e  $\sigma_{\min}$  são assimétricos em relação à tensão igual a zero.

**Razão de Tensões**

$$R = \frac{S_{\min}}{S_{\max}}$$

**Tensão Alternada**

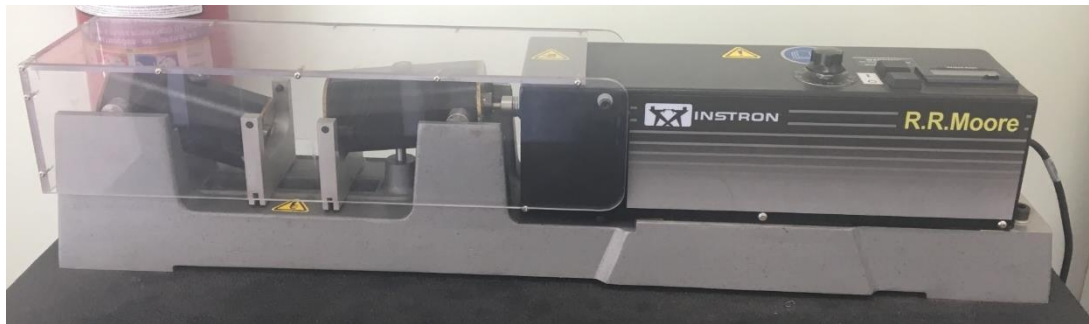
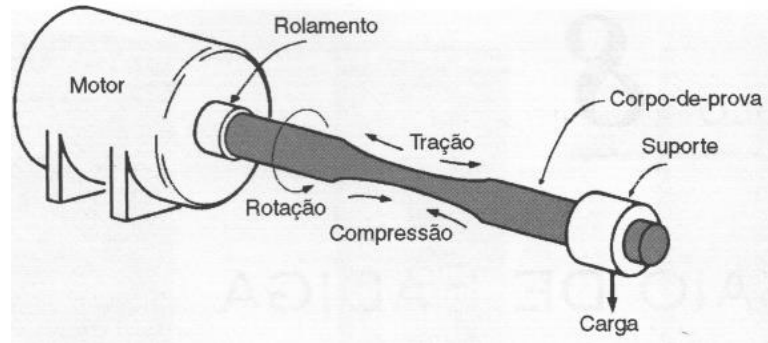
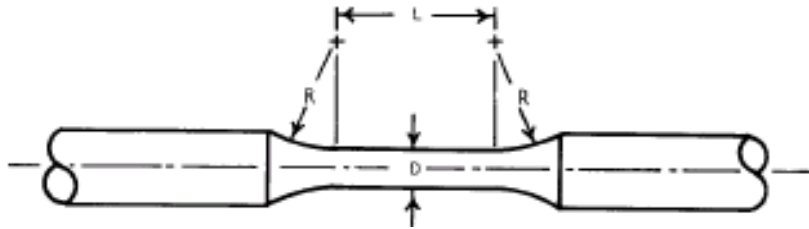
$$S_a = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{2}$$

**Tensão Média**

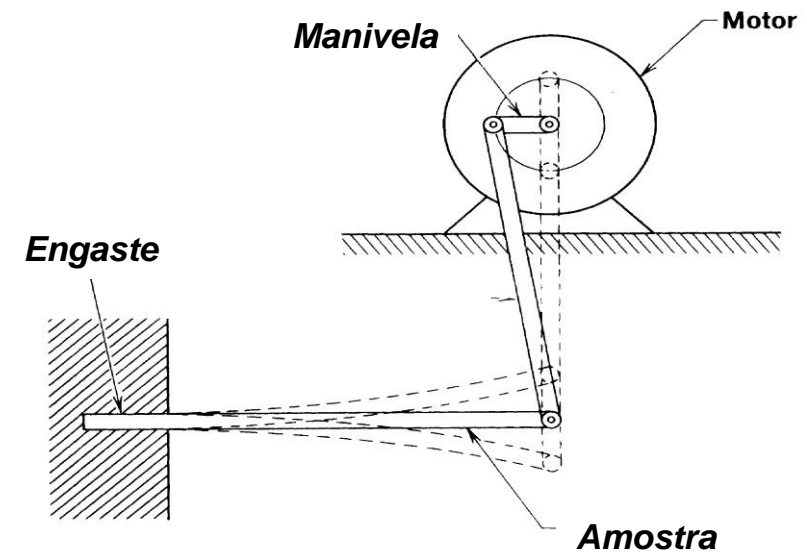
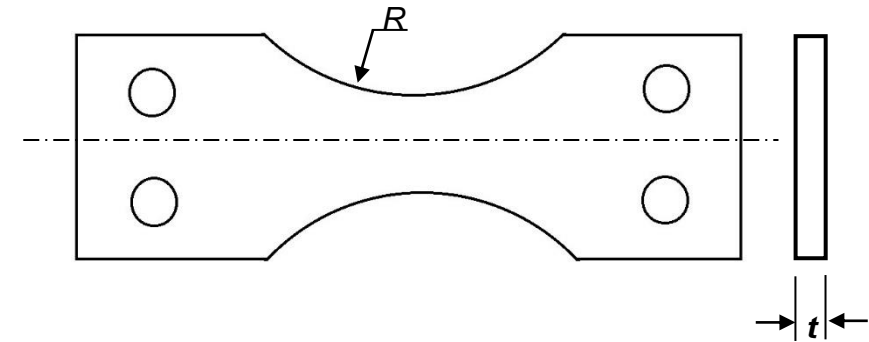
$$S_m = \frac{S_{\max} + S_{\min}}{2}$$

# Tipos de ensaios de Fadiga

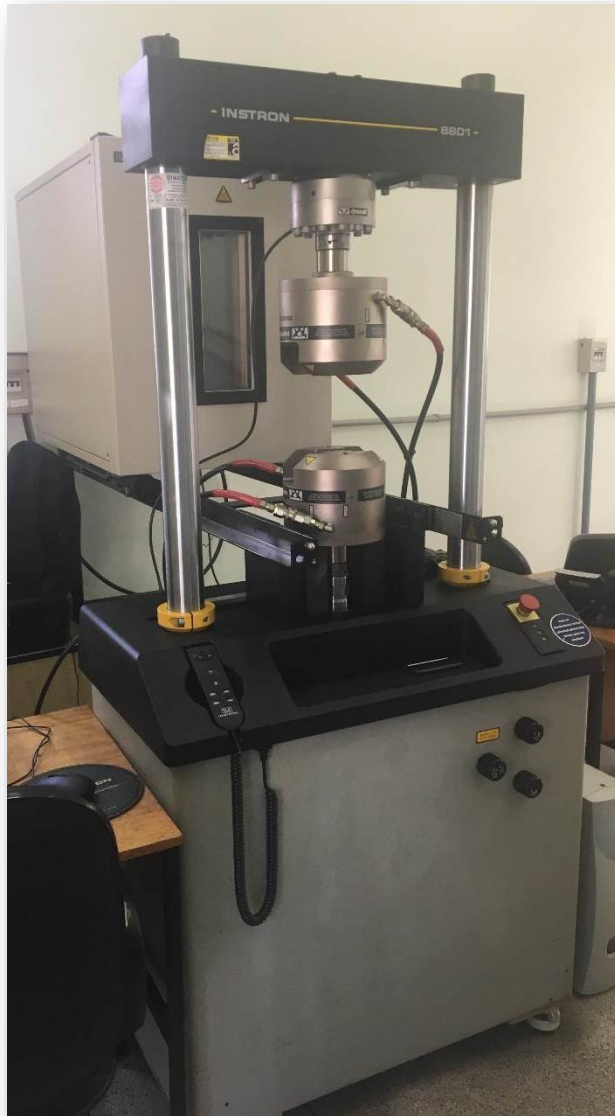
## Fadiga por Flexão Rotativa



## Fadiga por Flexão Alternada



# Tipos de ensaios de Fadiga



## Fadiga Axial

ASME E466 - 15

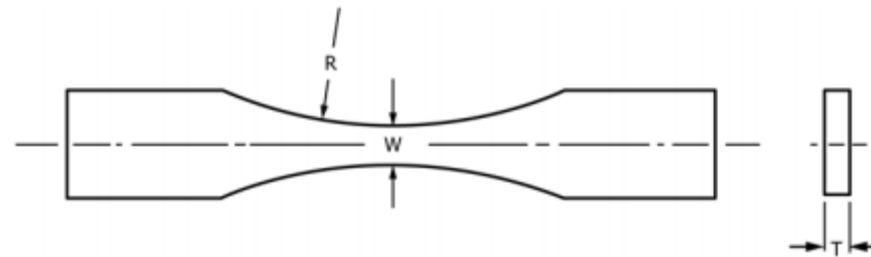


FIG. 2 Specimens with Continuous Radius Between Ends

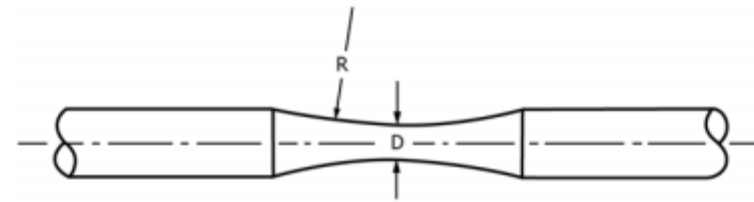


FIG. 3 Specimens with a Continuous Radius Between Ends

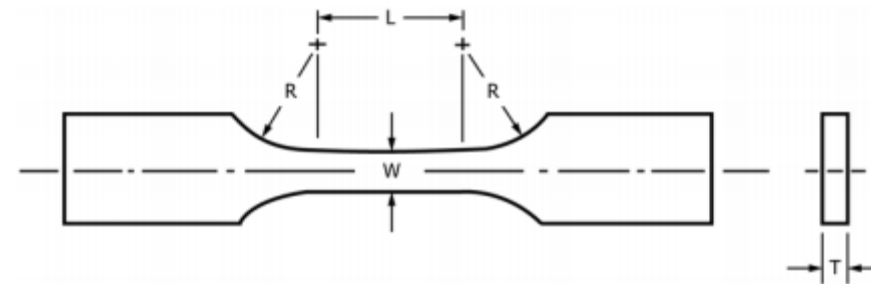
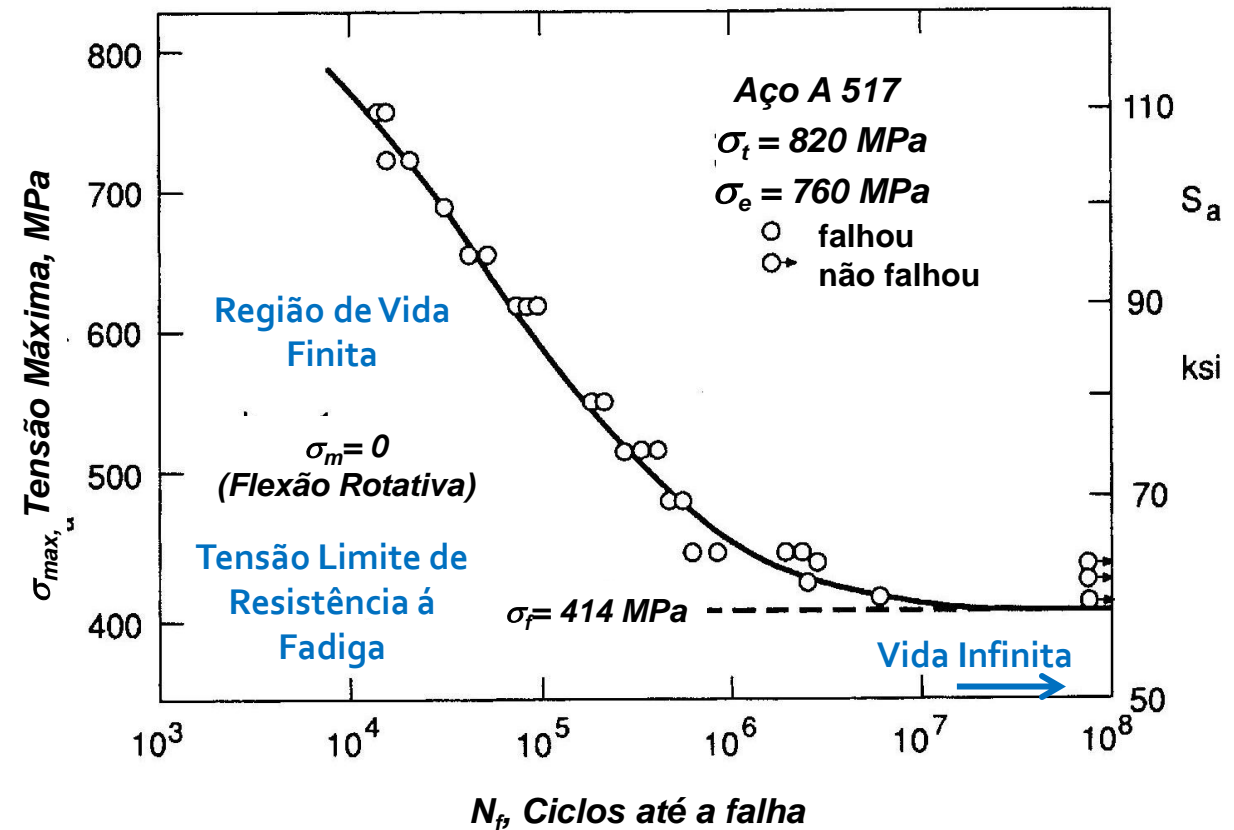


FIG. 4 Specimens with Tangentially Blending Fillets Between the Uniform Test Section and the Ends

# Resultado do ensaio de Fadiga – Curvas S-N

A forma mais comum de apresentação dos resultados experimentais de fadiga é através da **Curva S-N**

- ✓ O ensaio é realizado em **frequência** e **razão de carga** constante 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 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.

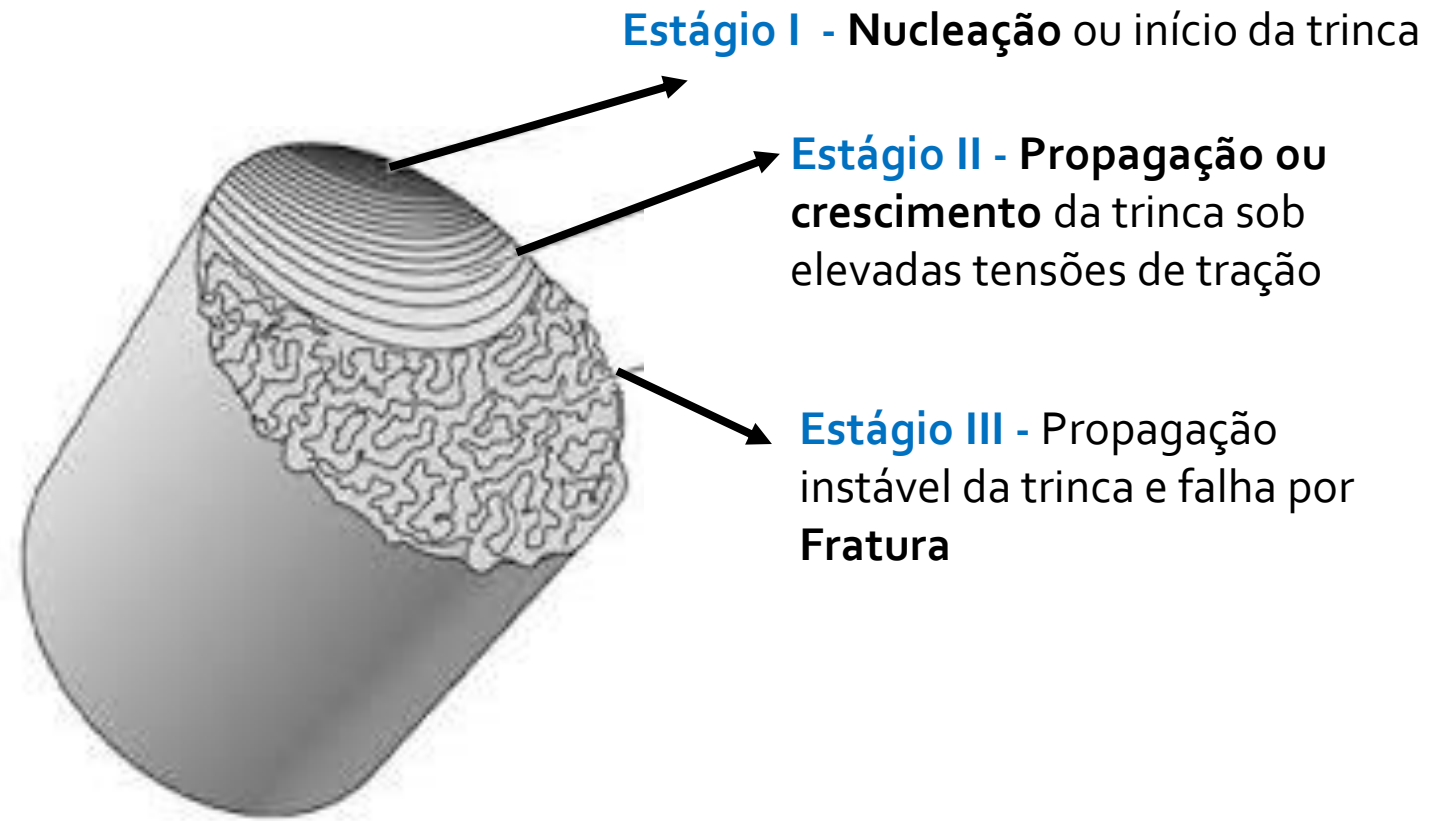


# Fratura por Fadiga

Corresponde por cerca de 90% das falhas em serviço

## Condições:

- ✓ Presença de tensões de tração;
- ✓ Variação na amplitude do carregamento;
- ✓ Número de ciclos suficiente para a propagação da trinca.



# REFERÊNCIAS E BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- CALLISTER JR., W. D; RETHWISCH, D.G.. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Um introdução**, 8ª ed, Rio de Janeiro: LTC, 2015.
- CALLISTER JR, W.D. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 7 th Ed. Wiley.
- GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos Materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2000.
- SOUZA, S. A. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos**. Fundamentos teóricos e práticos. 5 ed., São Paulo: Edgard Blucher, 1982.





***Muito  
obrigada!***

LOM3016 – Introdução à  
Ciência dos Materiais



Aula 8 –  
Propriedades  
Mecânicas dos  
Materiais – Parte 4

Kelly Benini



# Classificação dos Ensaios Mecânicos

## Quanto à integridade

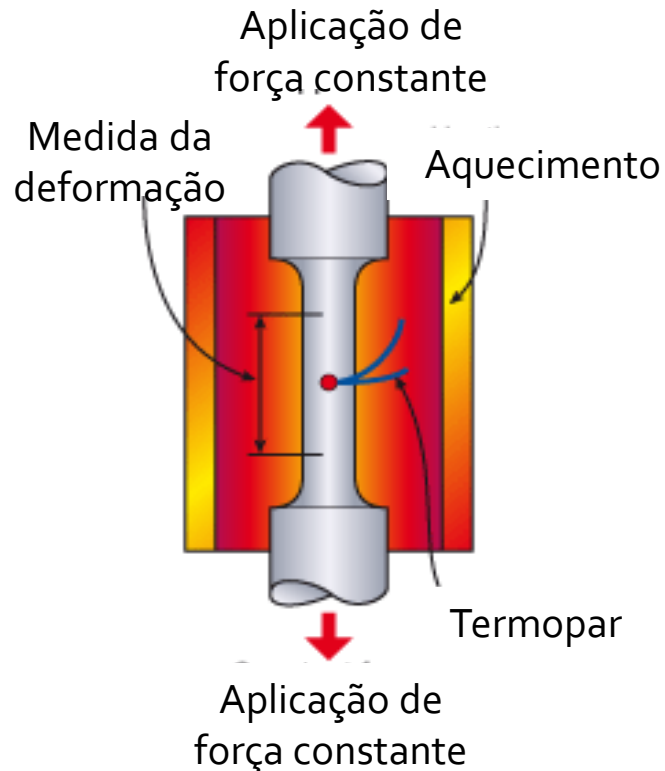
- Destrutivos: provocam inutilização parcial ou total da peça. Ex.: Tração, Fadiga, Fluência, Impacto, Torção, Flexão, Tenacidade à fratura
- Não destrutivos: não comprometem a integridade da peça. Ex.: Raios-X, Ultra-som, Líquidos penetrantes, Microdureza

## Quanto à velocidade

- Estáticos: carga aplicada lentamente (estado de equilíbrio). Ex.: Tração, Compressão, Flexão, Dureza e Torção
- Dinâmicos: carga aplicada rapidamente ou ciclicamente. Ex.: Fadiga e Impacto
- Carga constante: carga aplicada durante um longo período de tempo. Ex.: Fluência

# Ensaio de Fluência

**Definição de Fluência :** Deformação plástica acumulada com o tempo que um sólido apresenta, sob o efeito constante da tensão e temperatura.



Materiais submetidos a operações por **longos períodos** sob condições de **elevada temperatura** e **tensão mecânica**



Mudança de Comportamento Mecânico

- ✓ Difusão de átomos;
- ✓ Movimentação de Discordâncias;
- ✓ Escorregamento de Contornos de grão;
- ✓ Recristalização;

# Ensaio de Fluência

Pesos pendurados para aplicação de carga



Equipamentos de Ensaio de Fluência por tração

**Objetivo do Ensaio:**

**Determinação da vida útil** de um material quando submetido a carregamento estático e elevada temperatura.

Em materiais metálicos e cerâmicas cristalinas o fenômeno é influenciado pelo acréscimo de temperatura para valores entre **30 a 60% da Temperatura de fusão**

# Tipos de Ensaio de Fluência

## Fluência

- São medidas as deformações que ocorrem no material em função do tempo, mantendo a **tensão** e a **temperatura constantes**

## Ruptura por fluência

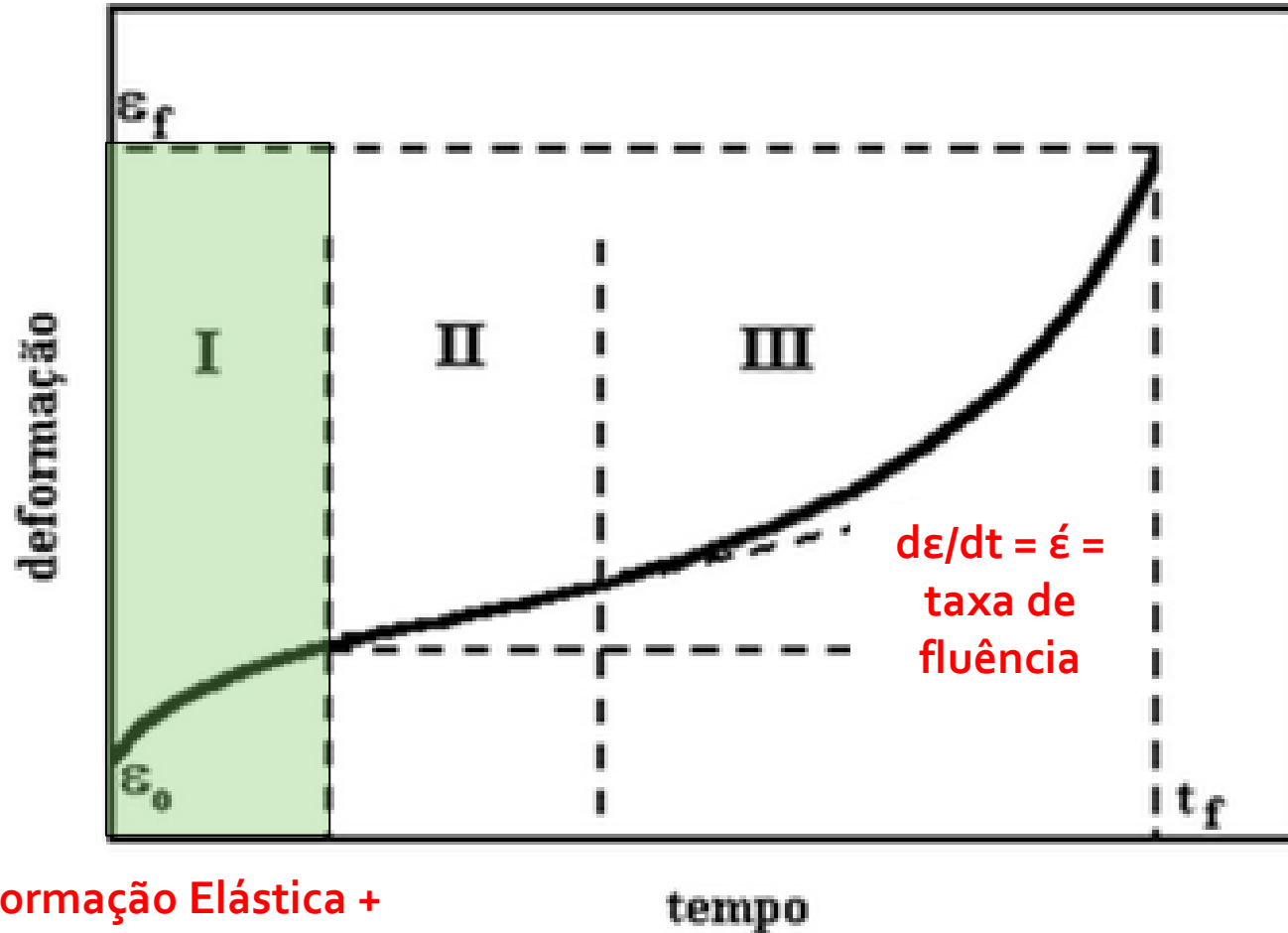
- Neste ensaio pode-se obter apenas o **tempo de ruptura total**;

## Relaxação

- Fornece informações sobre a redução da tensão (carga) aplicada ao material quando a **deformação** e a **temperatura são mantidas constantes**.

# Curva Típica do Ensaio de Fluência

## I – Estágio primário ou Fluência primária

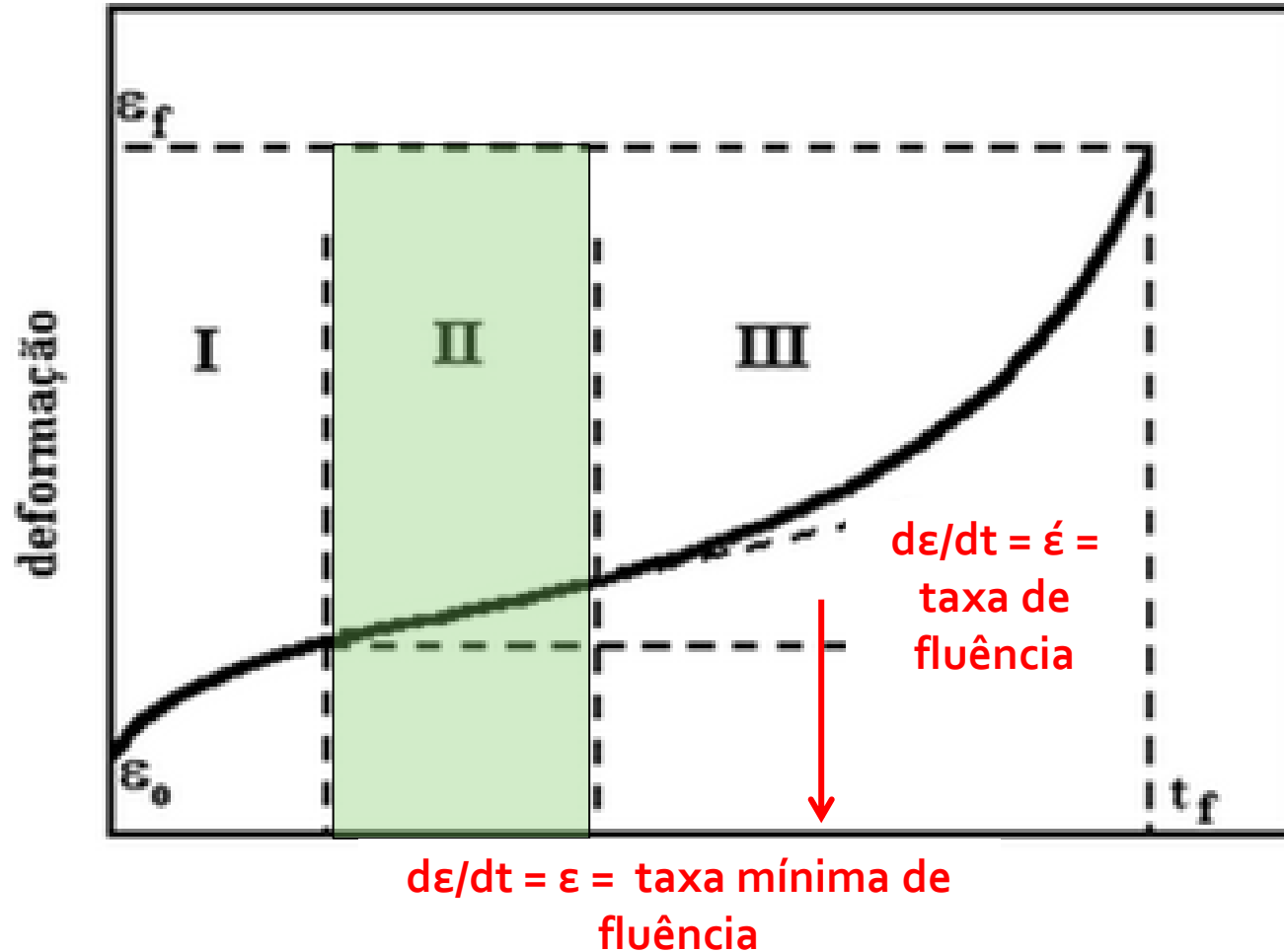


Deformação Elástica +  
Plástica

- ✓ Deformação instantânea  $\epsilon_0$  devido ao carregamento inicial;
- ✓ Decréscimo contínuo da taxa de fluência:  $\epsilon = d\epsilon/dt$ ;
- ✓ Aumento de resistência à fluência provocado pelo encruamento.

# Curva Típica do Ensaio de Fluência

## II– Estágio secundário ou fluência secundária

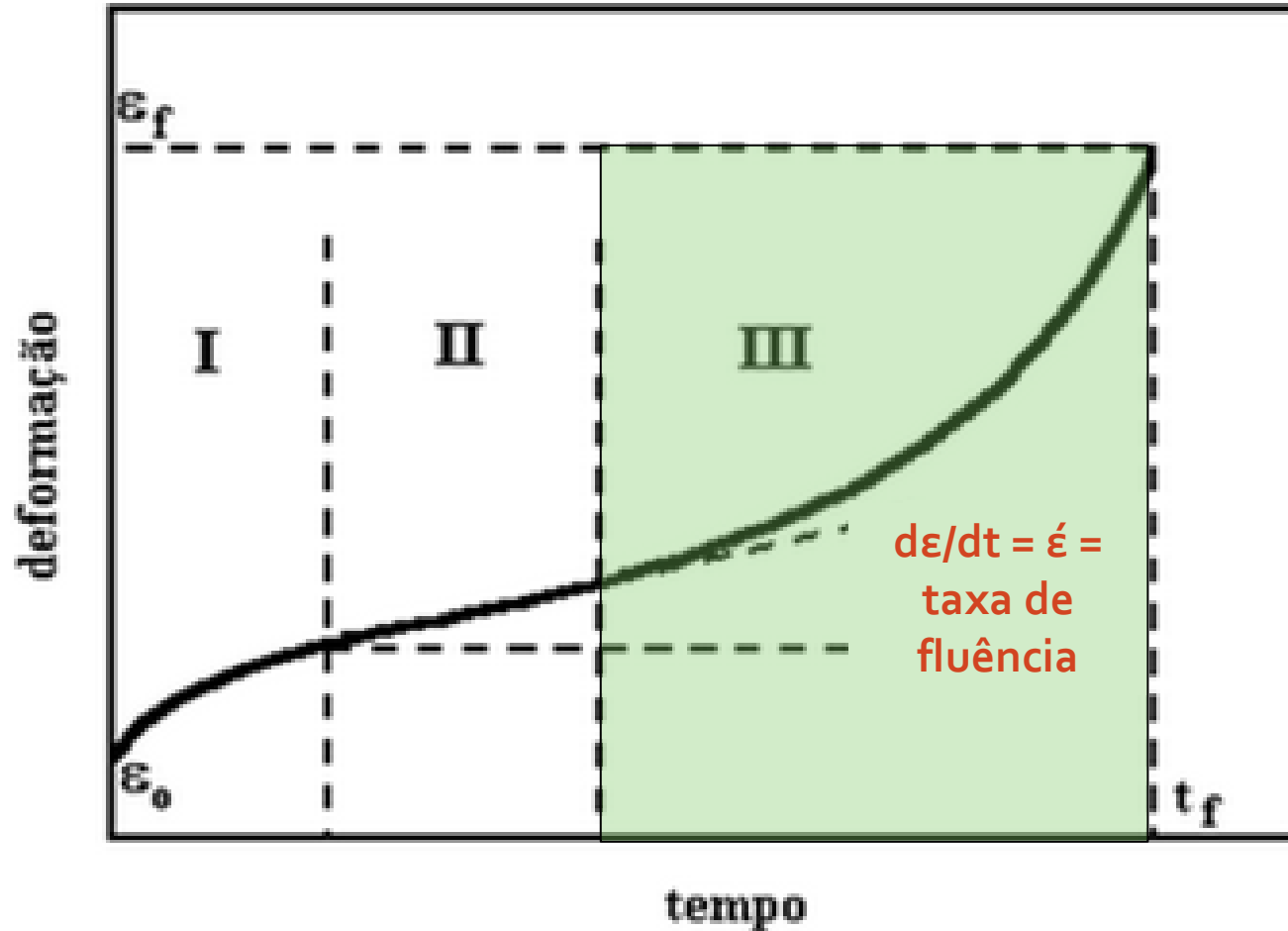


- ✓ Taxa de fluência essencialmente constante;
- ✓ Curva com aspecto linear;
- ✓ Ocorrência de fenômenos atuantes e competitivos (encruamento e recuperação);
- ✓ O valor médio da taxa de fluência no estágio secundário é chamado de taxa mínima de fluência



# Curva Típica do Ensaio de Fluência

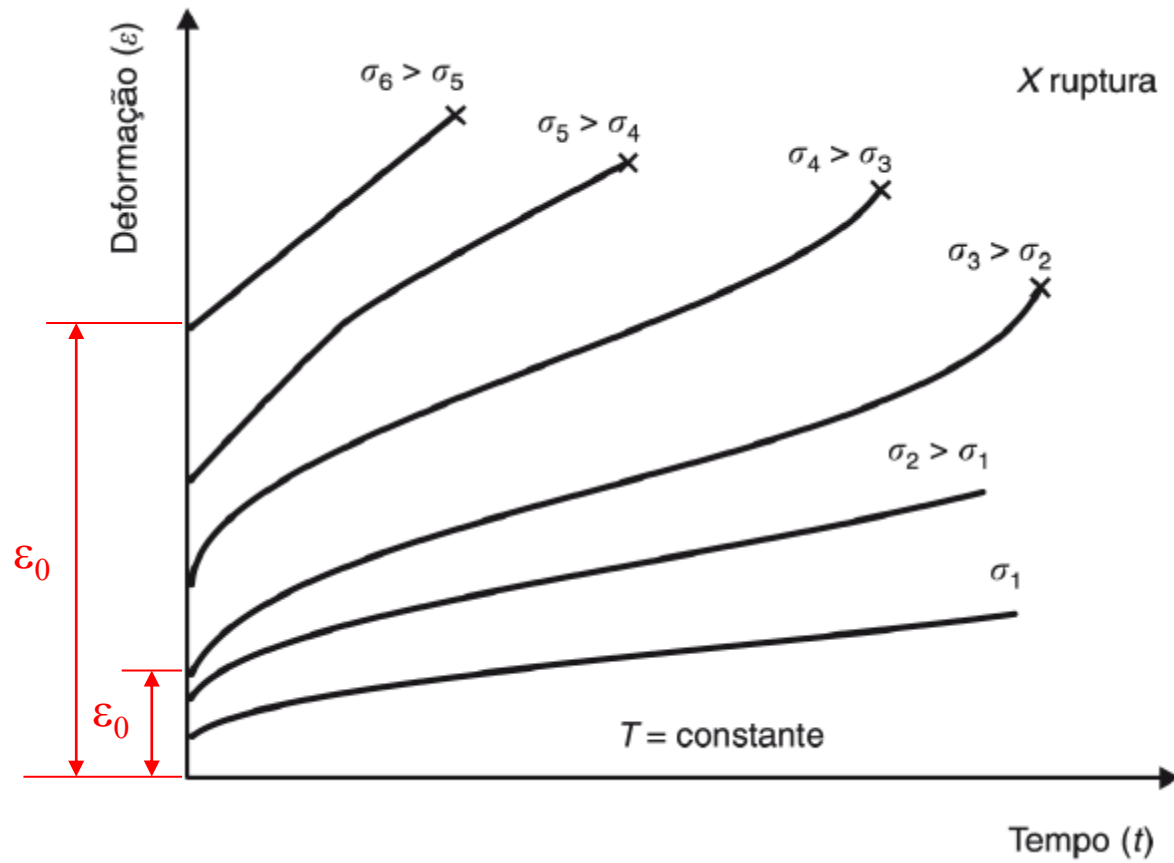
## III – Estágio terciário ou Fluência terciária



- ✓ Aumento da taxa de fluência;
- ✓ Ruptura do corpo de prova;
- ✓ Ocorre em ensaios com cargas e temperaturas elevadas;
- ✓ Propagação de trincas;
- ✓ Separação de contornos de grão;
- ✓ Redução localizada de área no cdp.

# Parâmetros que influenciam nos resultados de Fluência

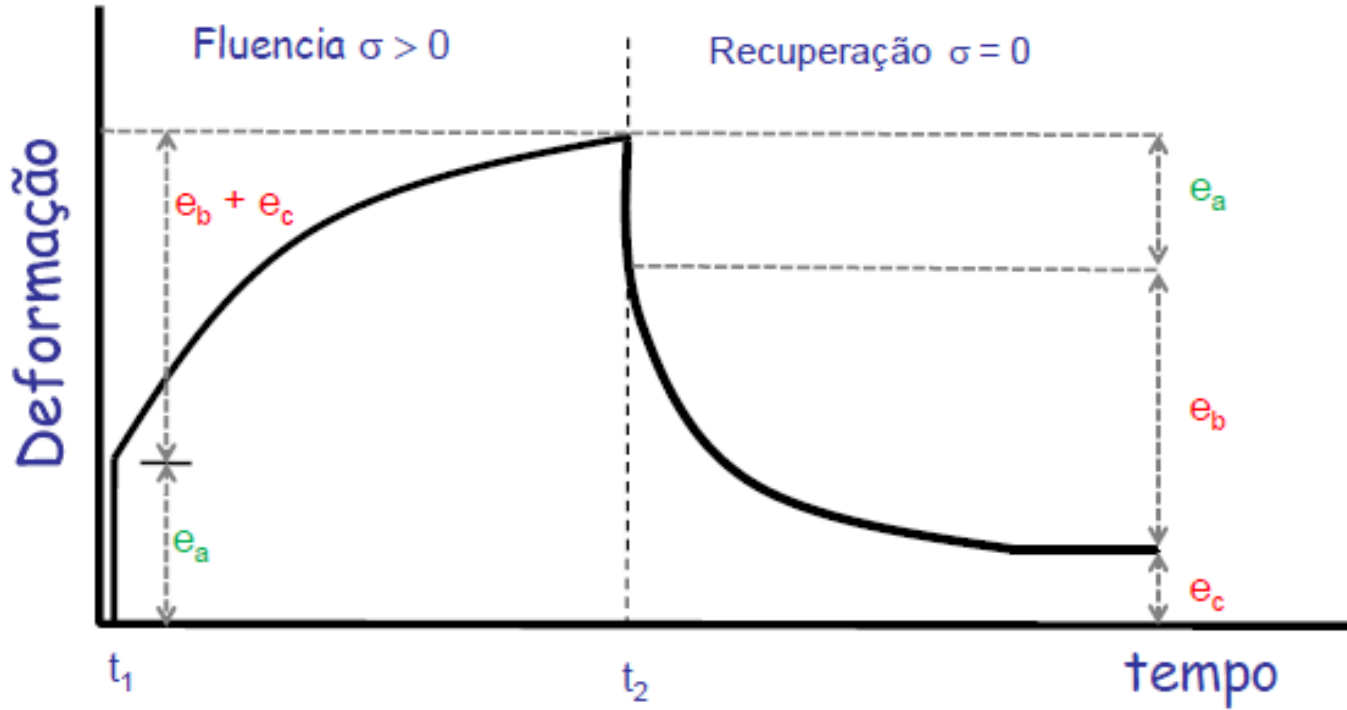
## Influência da Tensão



Quanto maior a tensão, maior é a deformação inicial e maior a taxa de fluência mínima

Menor tempo de vida do componente

# Fluência em Polímeros



Por que a sua curva de fluência é diferente?  
Eles exibem um comportamento de deformação incomum combinando propriedades elásticas e viscosas.



**Comportamento  
Viscoelástico**

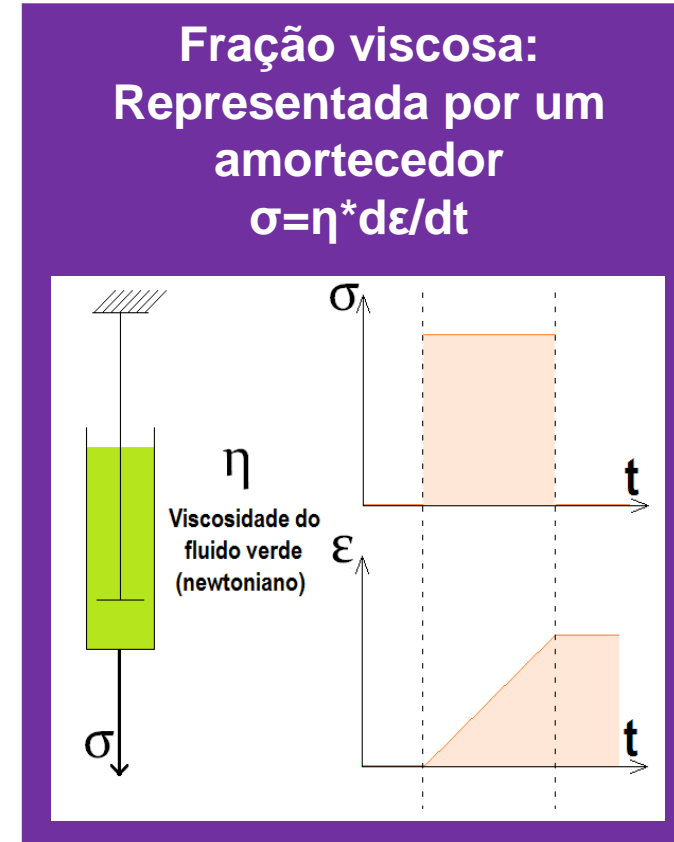
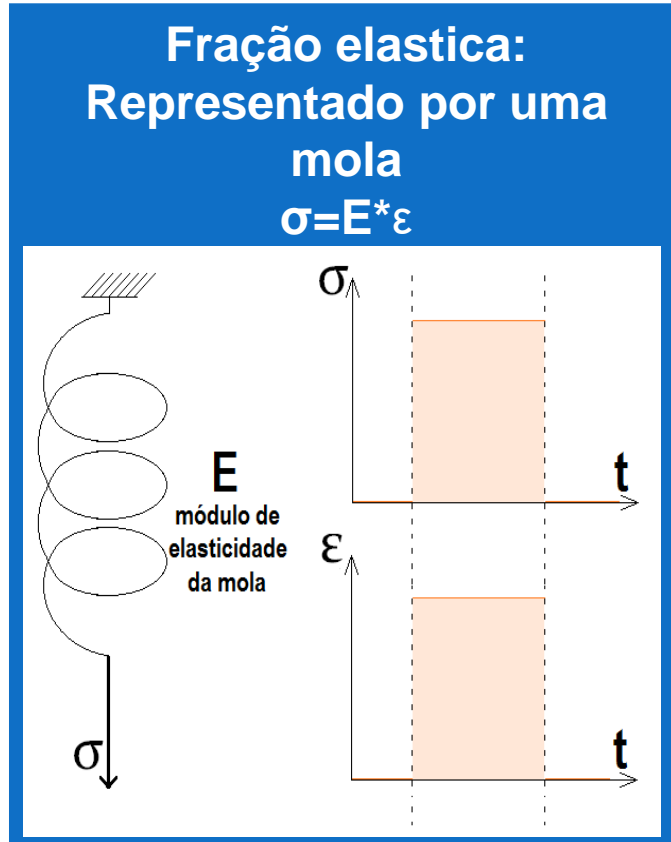
$e_a$  – deformação elástica imediata – recuperável

$e_b$  – deformação elástica retardada - recuperável

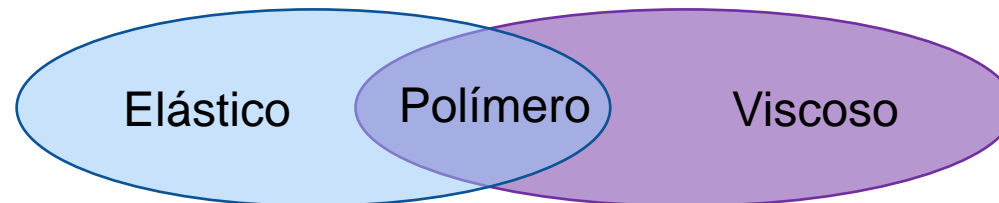
$e_c$  – deformação por escoamento plástico - permanente

# Comportamento Viscoelástico dos Polímeros

**E** – relacionado com a energia necessária para deformar os ângulos e distância de ligações entre os átomos da cadeia polimérica



**$\eta$**  – relacionado com o atrito entre as moléculas poliméricas durante a deformação

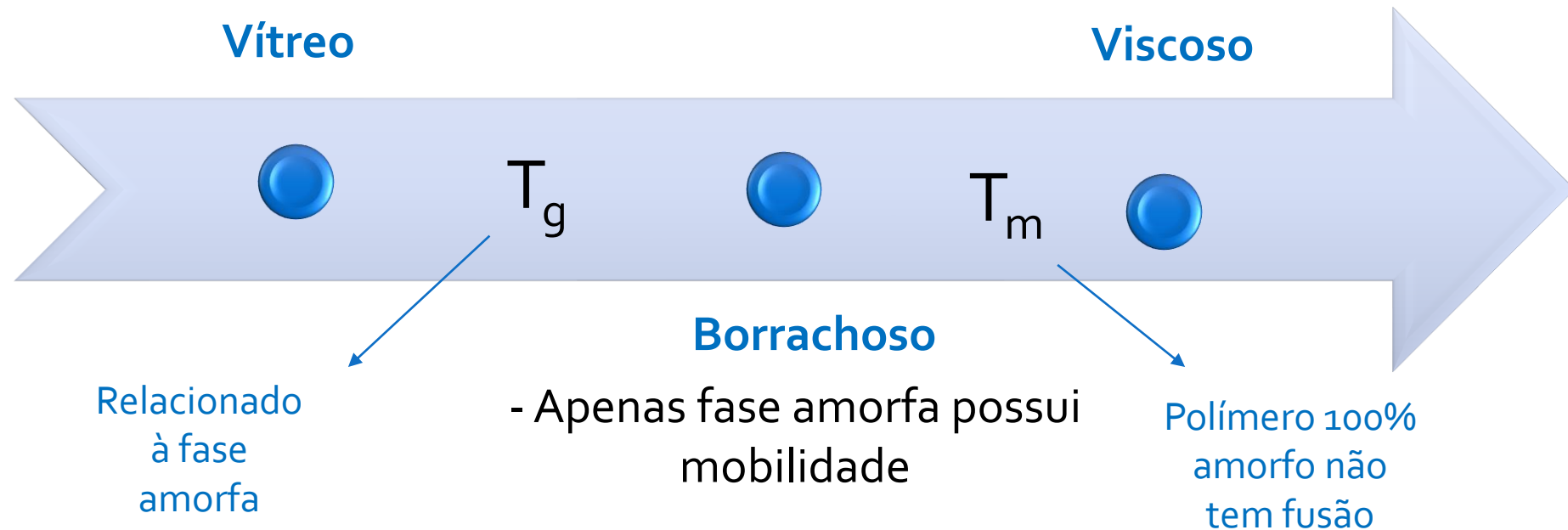


# Comportamento Viscoelástico dos Polímeros

## Polímero Semi-cristalino

- Polímero rígido e frágil
- Predominância da fase elástica

- Forte contribuição da resposta plástica à deformação



# Ensaio de Fluência para os diferentes Materiais

## Metais

- Aço inoxidável (acima de 11% de cromo);
- Superligas a base de níquel, cobalto e ferro;
- Ligas refratárias que apresentam elevadas temperaturas de fusão (nióbio, molibidênio, tungstênio, titânio, tântalo e cromo).

**Materiais mais resistentes à Fluência**

## Polímeros

- **Polímeros amorfos** – temperatura limite para ocorrência de fluência é a temperatura de transição vítrea (T<sub>g</sub>);
  - **Polímeros Termoplásticos** – resistência à fluência depende da movimentação cooperativa das cadeias.

## Cerâmicos

- Tensões de compressão à altas temperaturas;
- Nos vidros a resistência à fluência é mais influenciada pela mobilidade dos grupos de átomos dentro da rede de óxidos

# REFERÊNCIAS E BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- CALLISTER JR., W. D; RETHWISCH, D.G.. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Um introdução**, 8ª ed, Rio de Janeiro: LTC, 2015.
- CALLISTER JR, W.D. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 7 th Ed. Wiley.
- GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos Materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2000.
- SOUZA, S. A. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos**. Fundamentos teóricos e práticos. 5 ed., São Paulo: Edgard Blucher, 1982.
- CANEVAROLO Jr., S. V. **Ciência dos Polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. São Paulo: Artliber Editora, 2002.



***Muito  
obrigada!***