

NOVA SCHOOL OF
SCIENCE & TECHNOLOGY

Ciência dos Materiais A

Departamento de Ciência dos Materiais

Margarida Lima (mmal@fct.unl.pt), Rui Borges (rcb@fct.unl.pt);

Carmo Lança (mcl@fct.unl.pt)

Departamento de Química

Ana Rita Duarte (ard08968@unl.pt)

FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Ano letivo de 2023-2024



PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS

Conteúdos programáticos

- Definir tensão e extensão nominais, tensão e extensão reais,
- Ensaio de tração, distinguir entre deformação elástica e plástica,
- Lei de Hooke aplicável ao domínio elástico,
- Diagramas tensão-extensão, identificar o módulo de elasticidade, tensão de cedência, tensão de rotura, e tensão de fratura,
- Ductilidade, resiliência e tenacidade,
- Ensaio de dureza.

- A determinação e/ou o conhecimento das propriedades mecânicas é fundamental para a escolha do material para uma determinada aplicação, bem como para o projecto e fabricação de um componente.
- As propriedades mecânicas definem o comportamento do material quando sujeitos a esforços mecânicos (estão relacionadas com a capacidade do material em transmitir ou resistir a estes esforços).

Como determinar as propriedades mecânicas?

- Através de ensaios mecânicos.
- Utilizam-se provetes (amostra normalizada) uma vez que não é praticável realizar o ensaio na própria peça, que seria o ideal.
- Normas técnicas para o procedimento das medidas e do provete para garantir que os resultados sejam comparáveis (ASTM - American Society for Testing and Materials).

PRINCIPAIS PROPRIEDADES MECÂNICAS

Resistência à tracção

Elasticidade

Ductilidade

Fluência

Fadiga

Dureza

Tenacidade

Cada uma destas propriedades está associada à capacidade do material em resistir às forças mecânicas e/ou em transmiti-las

TIPOS DE TENSÕES A QUE UMA ESTRUTURA ESTÁ SUJEITA

Tracção

Compressão

Corte/Torção

TESTES MAIS COMUNS PARA DETERMINAR PROPRIEDADES MECÂNICAS

- Resistência à tração (+ comum, determina o alongamento)
- Resistência à compressão
- Resistência à torção
- Resistência ao choque
- Resistência ao desgaste
- Resistência à fadiga
- Dureza
- ...

Tensão e Extensão

Tensão (σ): Força por unidade de área resultante da carga aplicada (tracção, compressão, torção, corte ou combinações de várias).

F-força; **A**-área

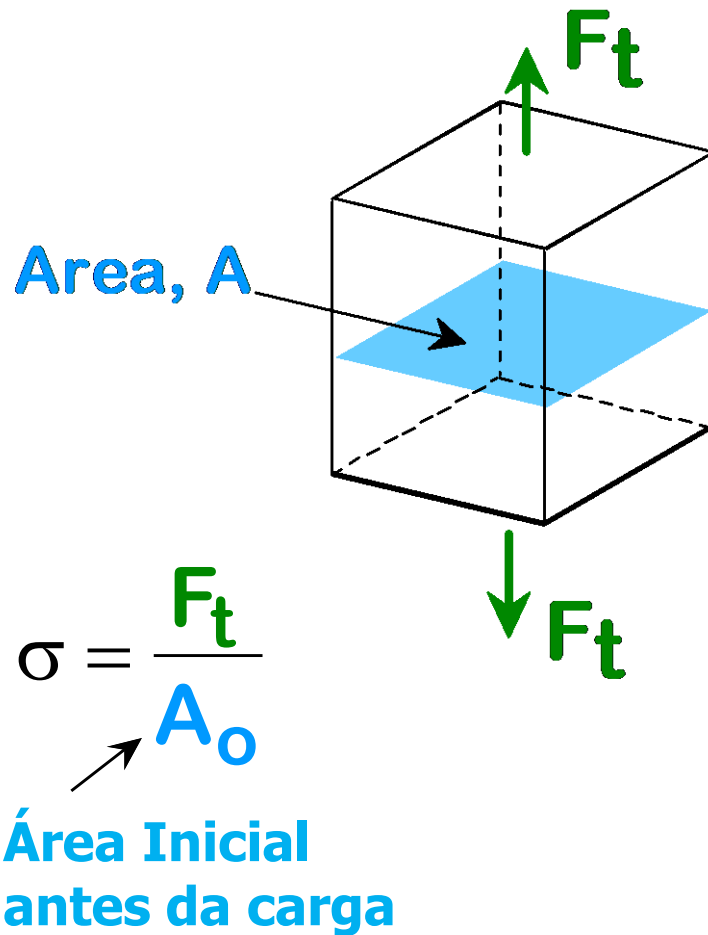
$$\sigma = F/A$$

Extensão (ϵ): extensão ou deformação física: resposta de um material à tensão, % alongamento: $\Delta l/l_0 = (l_f - l_0)/l_0$.

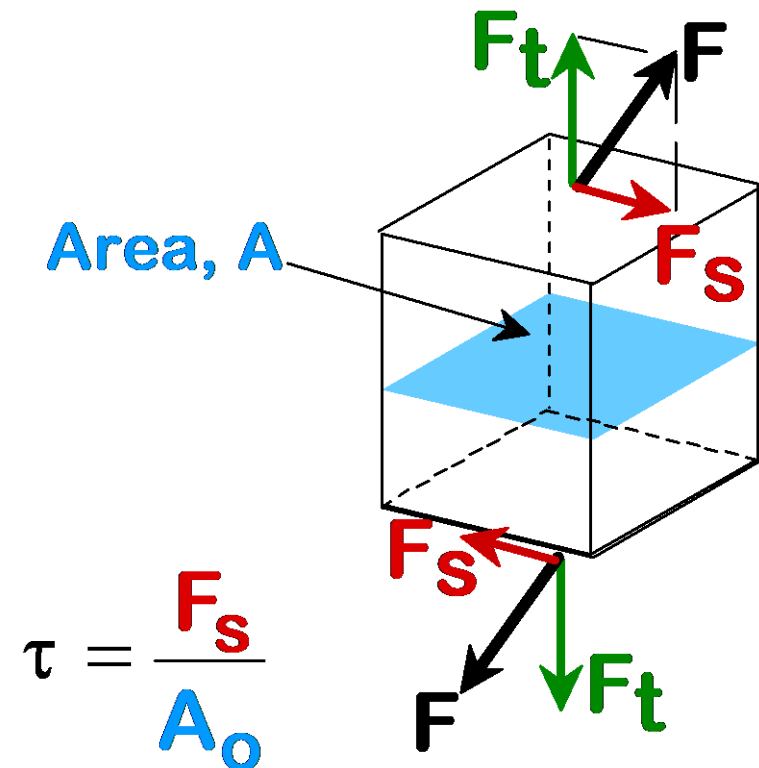
$$\epsilon = \Delta l/l_0 = (l_f - l_0)/l_0$$

Tensão nominal

Tracção (tensile)



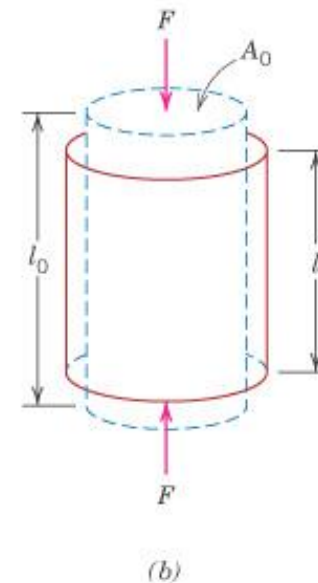
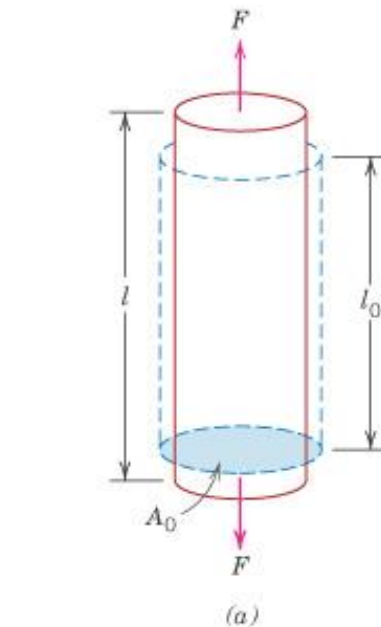
Corte (shear)



Unidades: N/m² (ou Pa)

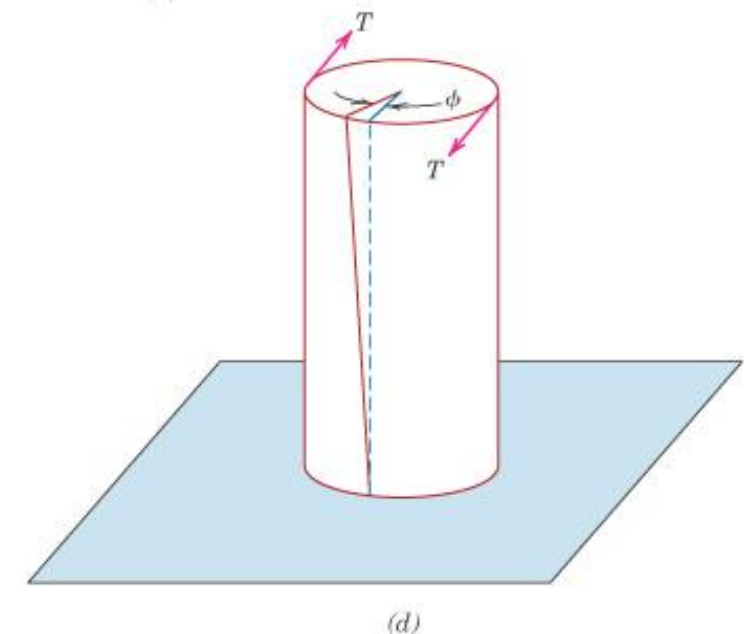
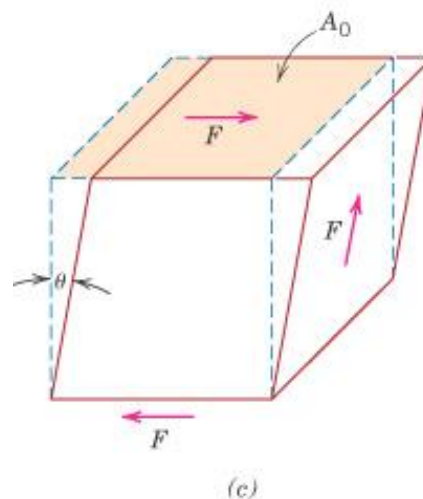
Tensão $\sigma = F/A_0$

Extensão $\epsilon = (l - l_0)/l_0$



Tensão $\tau = F/A_0$

Extensão $\gamma = \tan \theta$



Estados de tensão

Tensão **simples** : cabo



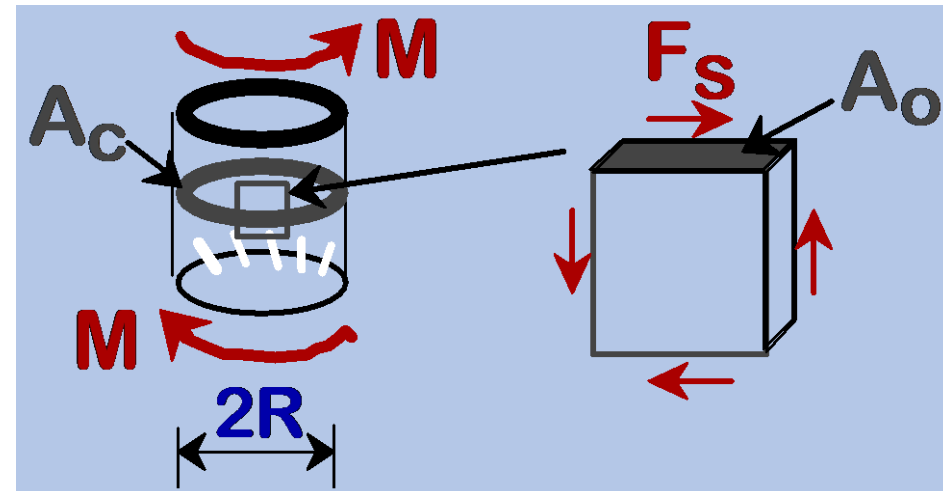
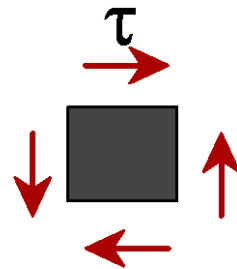
A_0 = cross sectional
Area (when unloaded)

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$



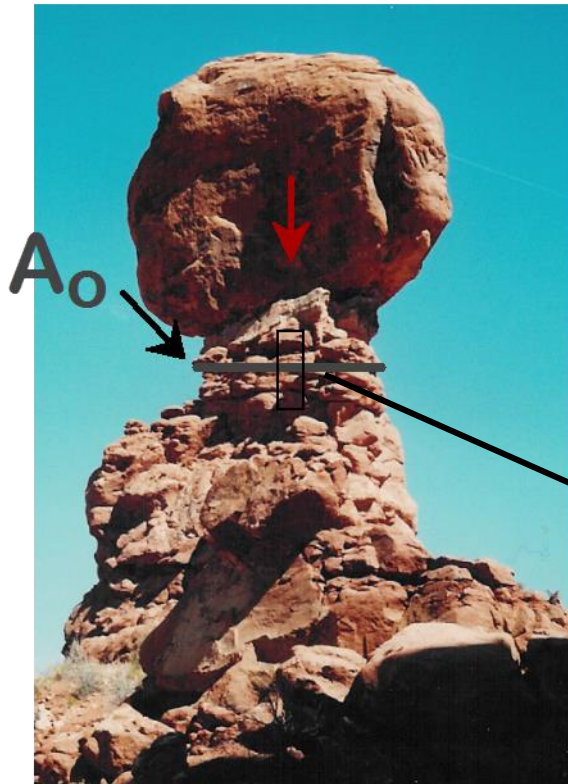
Corte **simples** : eixo motor

$$\tau = \frac{F_s}{A_0}$$



Estados de tensão

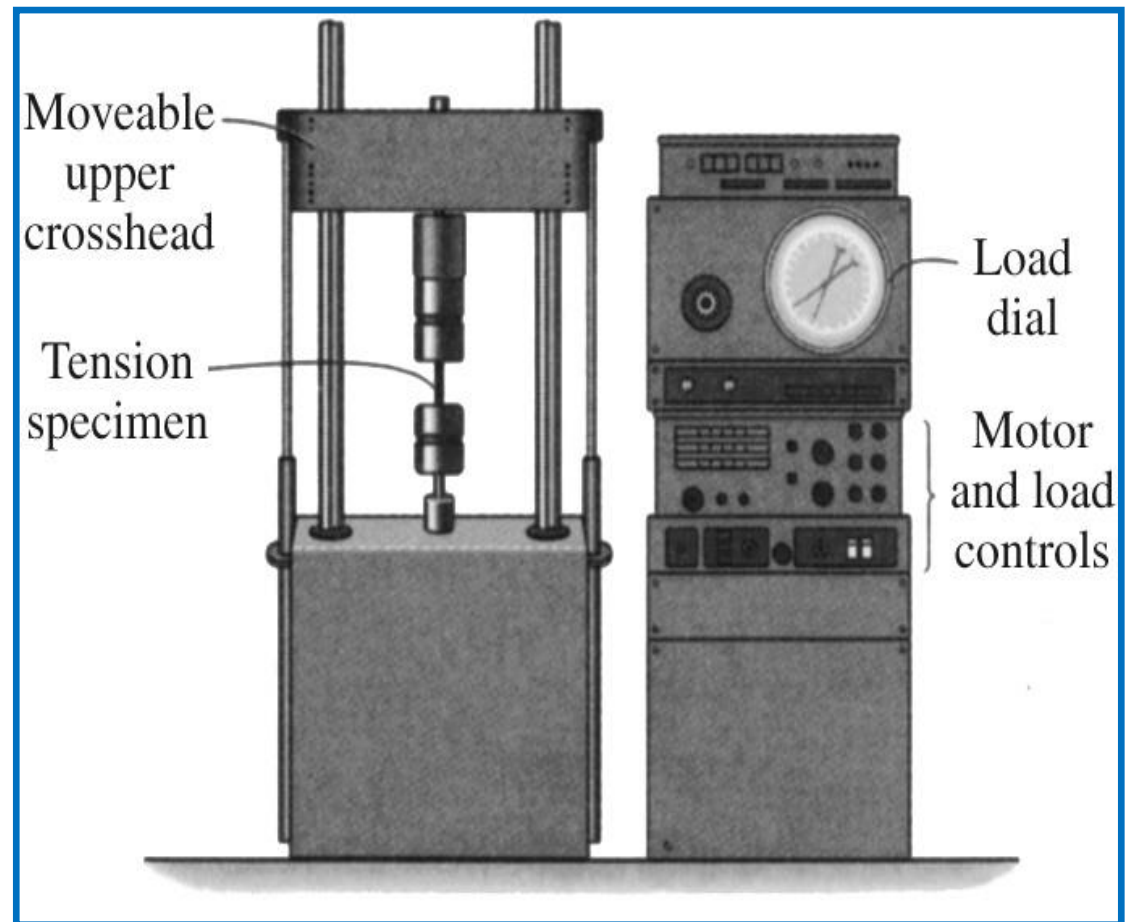
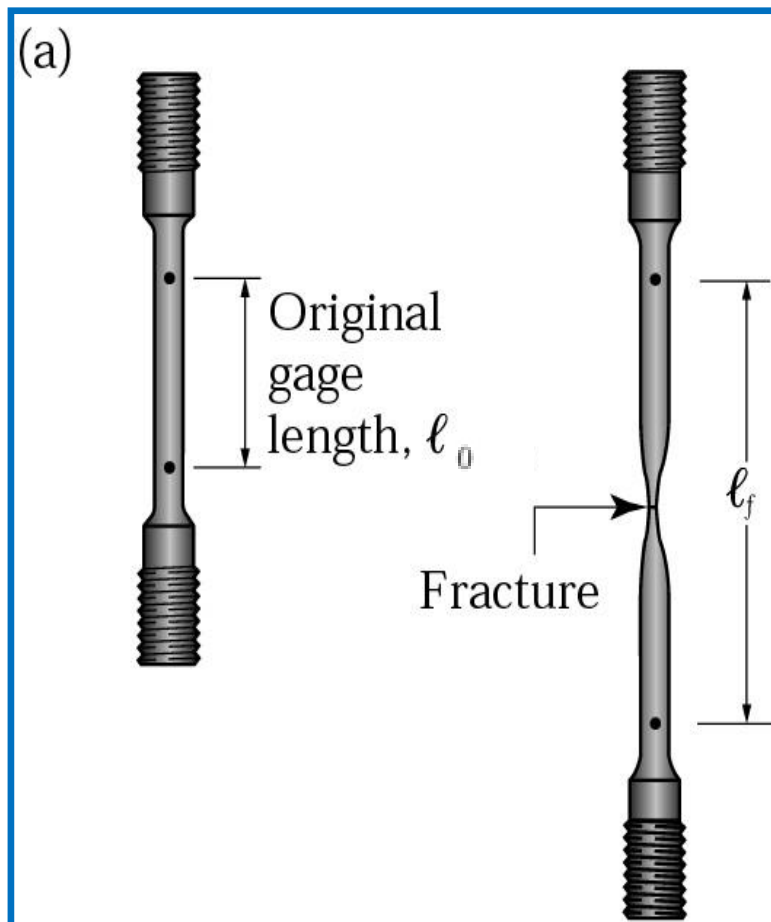
•Compressão **Simples** :



$$\sigma = \frac{F}{A_o}$$

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

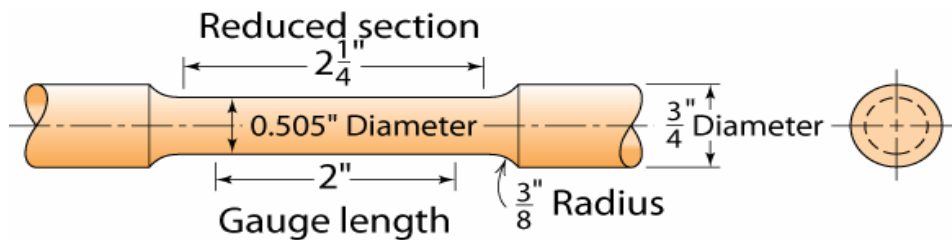
- Submete-se o material a uma carga ou força de tração, que promove uma deformação progressiva de aumento de comprimento



Ensaio de tração e o efeito que provoca nos materiais

- Sistema de aplicação de carga com um dispositivo para prender o provete
- sensores de medição da tensão aplicada e da deformação

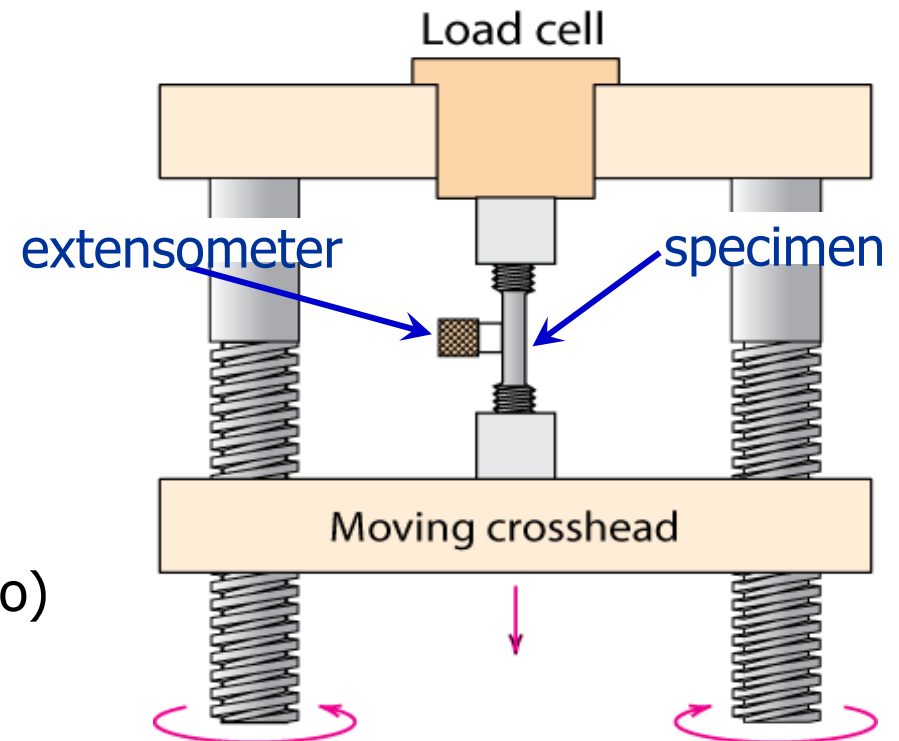
Provete de tracção

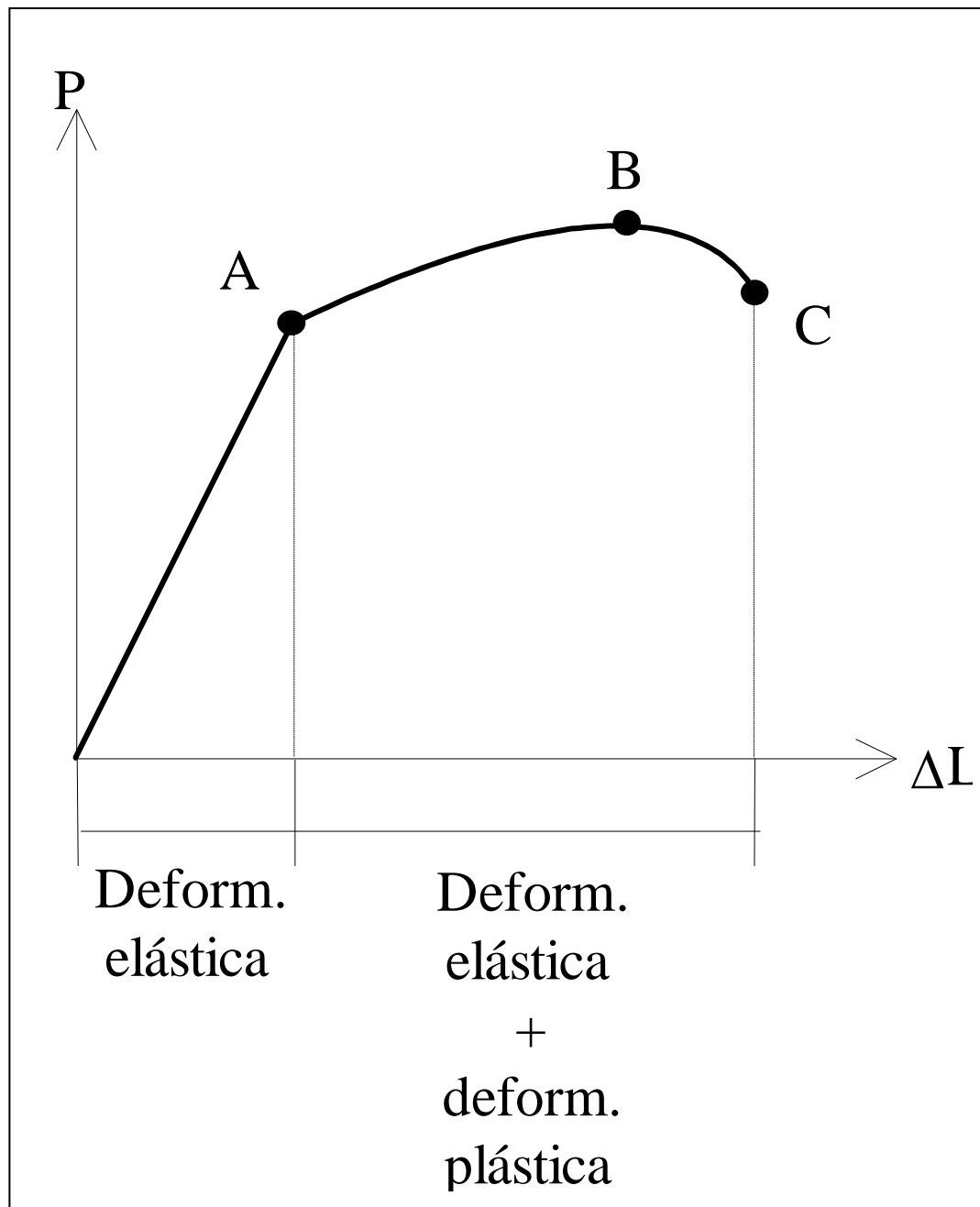


Frequentemente 12.8 mm x 60 mm

- Outros tipos de provete:
 - compressão: materiais frágeis (e.g., betão)
 - torção: tubos cilíndricos.

Máquina de ensaios de tracção





RESISTÊNCIA À TRACÇÃO

TENSÃO (σ) vs. Deformação (ε)

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

Tensão nominal

Como efeito da aplicação de uma tensão obtém-se uma deformação (variação dimensional).

$$\varepsilon = (l - l_0) / l_0 = \Delta l / l_0$$

Extensão nominal

A deformação pode ser expressa como:

- o nº de mm de deformação por mm de comprimento
- uma percentagem do comprimento inicial

A deformação pode ser:

Elástica
Plástica

- Tensão e extensão nominal

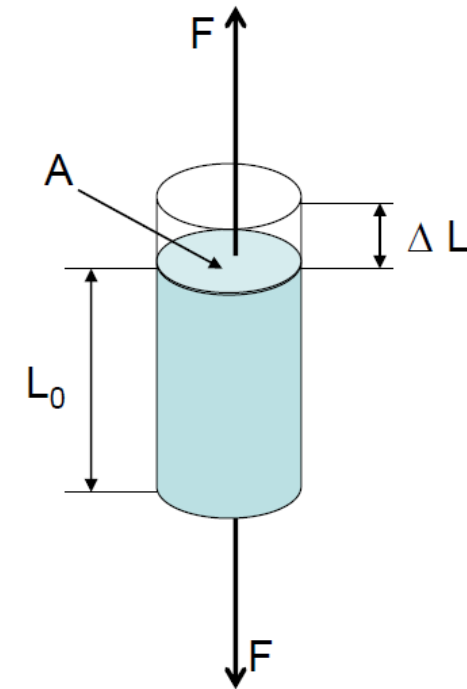
$$\sigma = F/A_0 \rightarrow \text{N/m}^2 \text{ ou Pa}$$

Força ou carga uniaxial média

Área inicial da secção recta transversal

$$\varepsilon = (l - l_0)/l_0 = \Delta l/l_0$$

Extensão nominal



- Tensão e extensão real

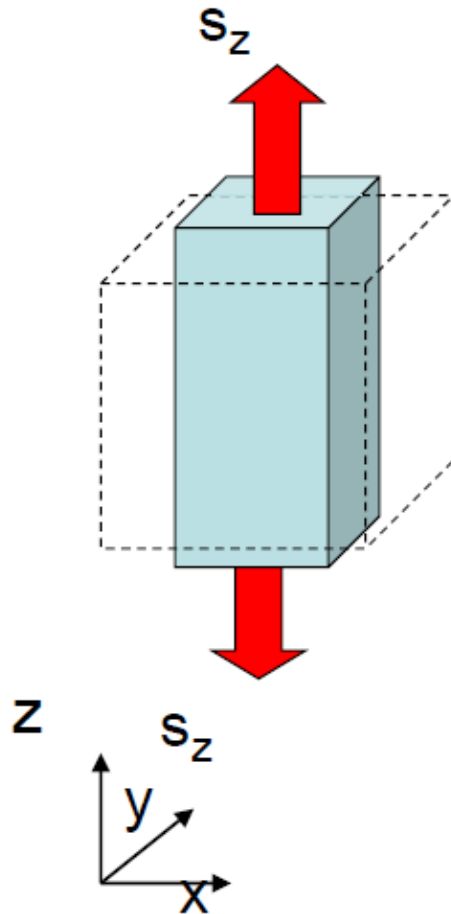
$$\sigma_r = F/A_i \rightarrow \text{N/m}^2 \text{ ou Pa}$$

Força ou carga uniaxial aplicada

Área instantânea da secção recta transversal

$$\varepsilon_r = \ln l_i/l_0$$

Extensão real



- **Coeficiente de Poisson ν** - razão entre a extensão axial e a extensão (contração) segundo uma direção transversal

$$\nu = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_z} = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_z}$$

- motivada pela exigência de conservação do volume durante a deformação

Tensão nominal

Stress, s
 $\frac{P}{A_0}$

Tensão de rotura (UTS)

(resistência à tração)

Ultimate tensile
strength (UTS)

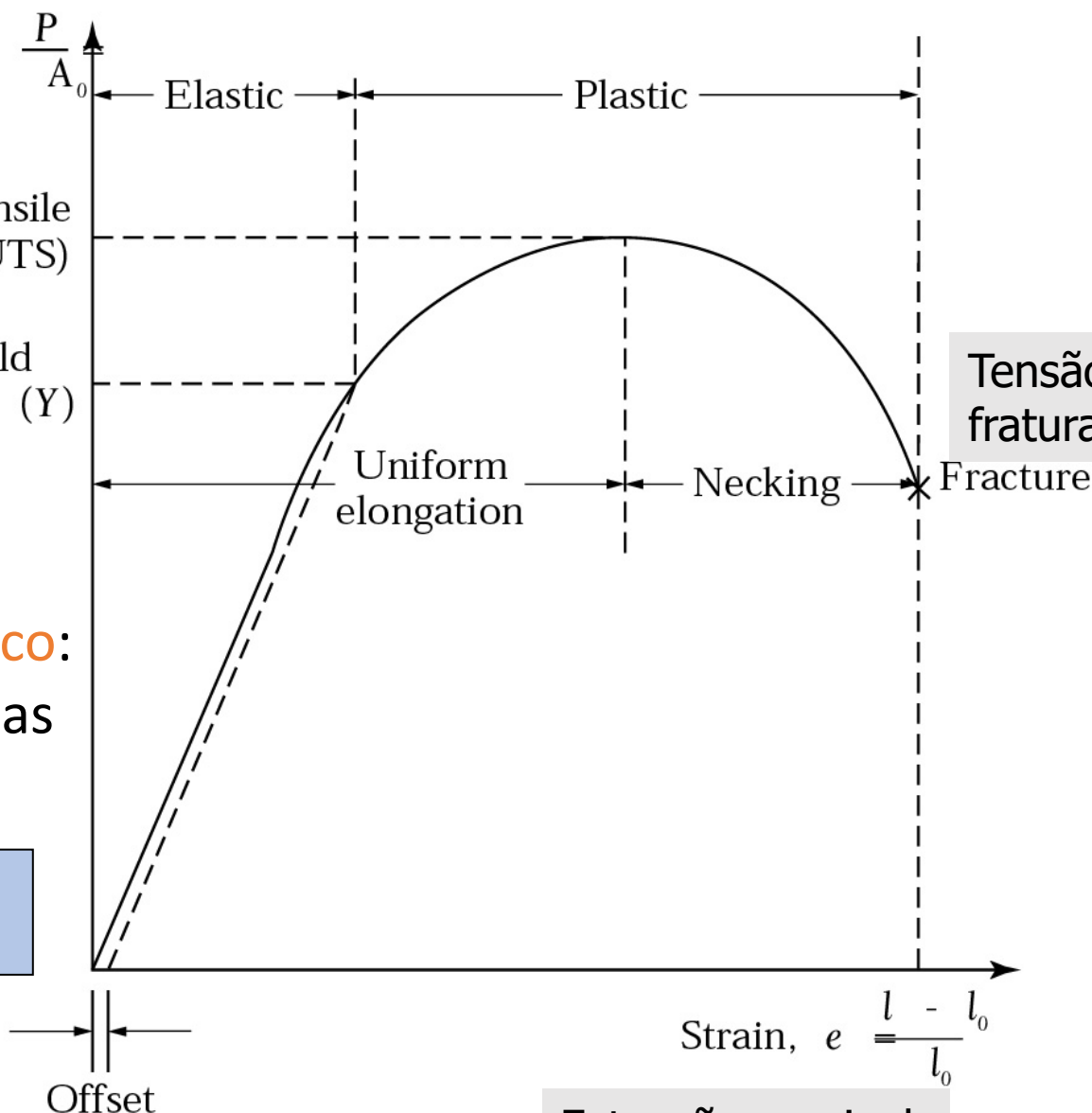
Tensão de cedência

Yield
stress (Y)

Tensão de
fratura

- Comportamento **Elástico**:
Quando as cargas são pequenas

Módulo de Young : E (Gpa)



Extensão nominal

Tensão nominal

Stress, s
 $\frac{P}{A_0}$

Tensão de rotura
(resistência à tração)

Ultimate tensile
strength (UTS)

Tensão de cedência

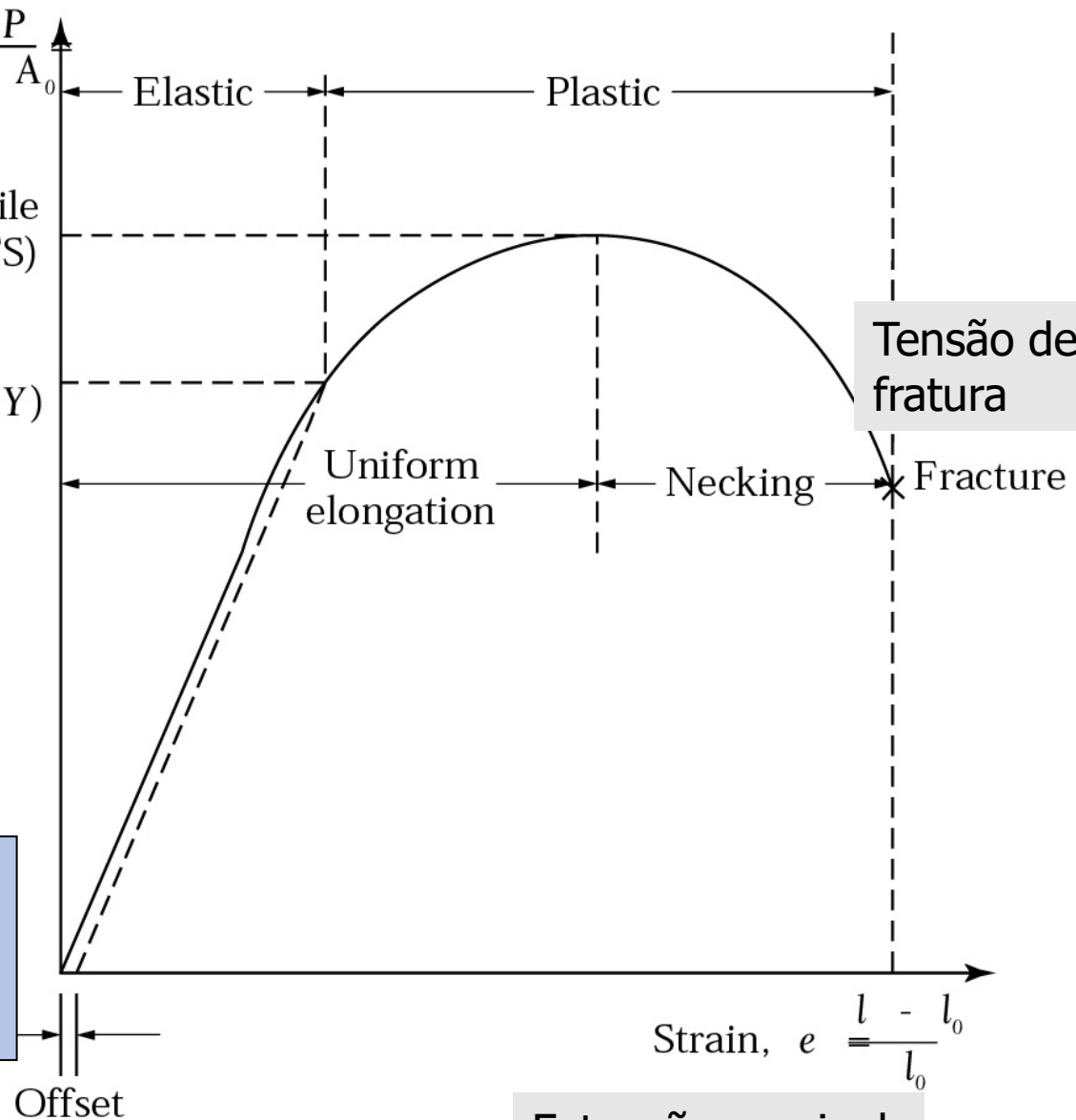
Yield
stress (Y)

Tensão de
fratura

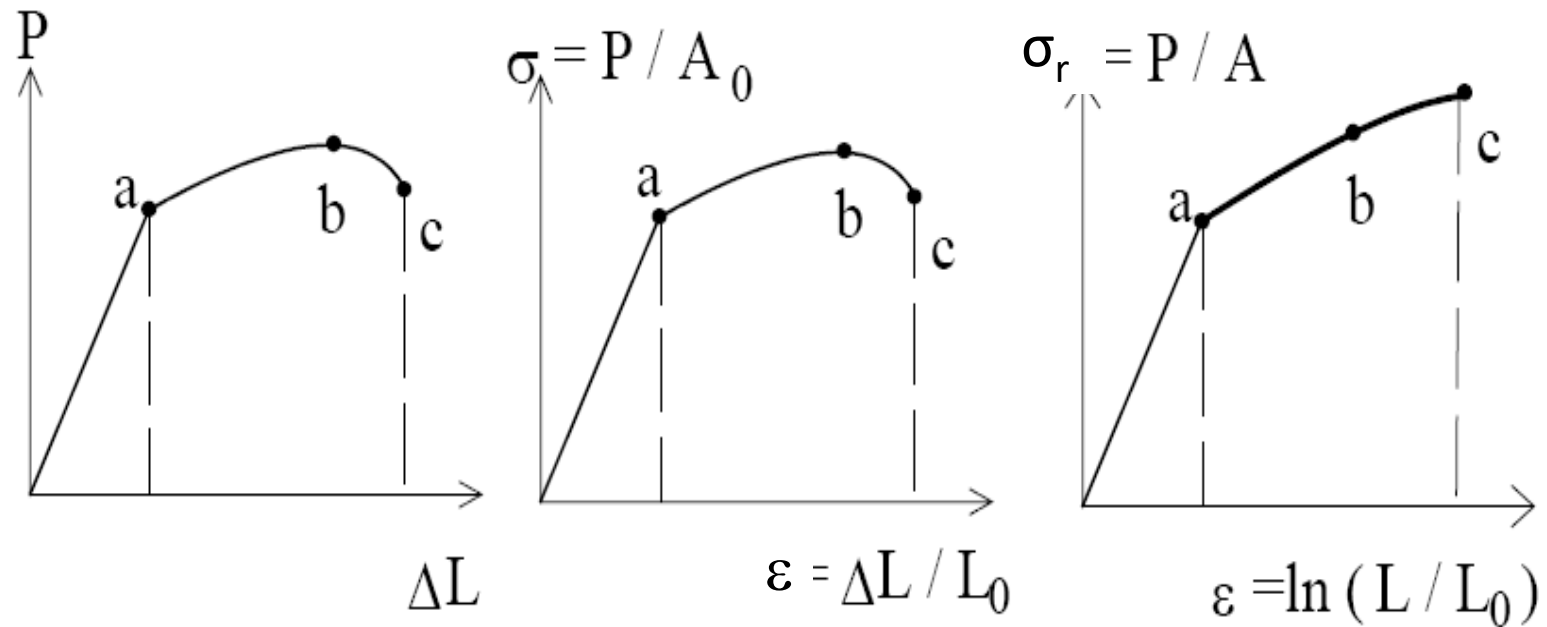
- Comportamento **Plástico** :
deslocações e *deformação*
permanente

Tensão de cedência : σ_Y
(deformação permanente)

Tensão de rotura: σ_R (estricção)



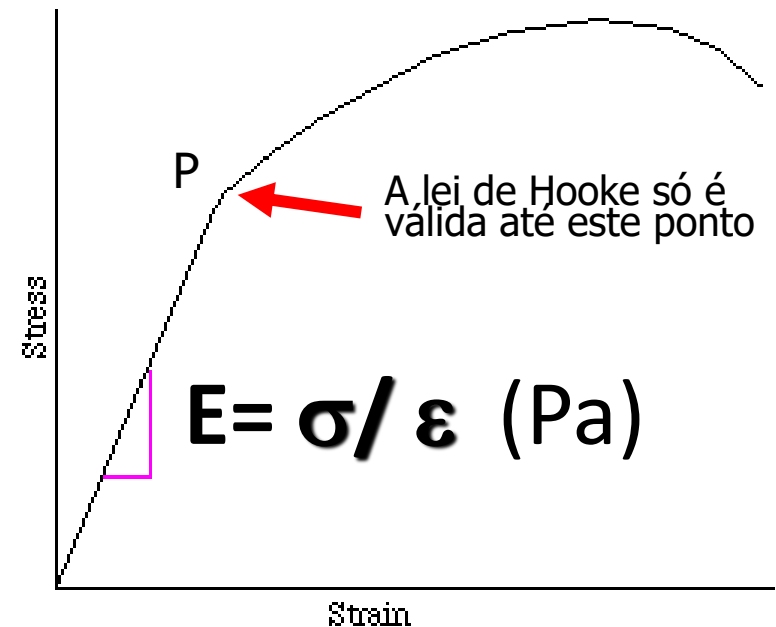
Extensão nominal



- a) Curva de carga (P) em função do alongamento ΔL
- b) Curva de tensão nominal (σ) em função da extensão nominal (ϵ)
- c) Curva de tensão real (σ_r) em função da extensão real (ϵ_r)

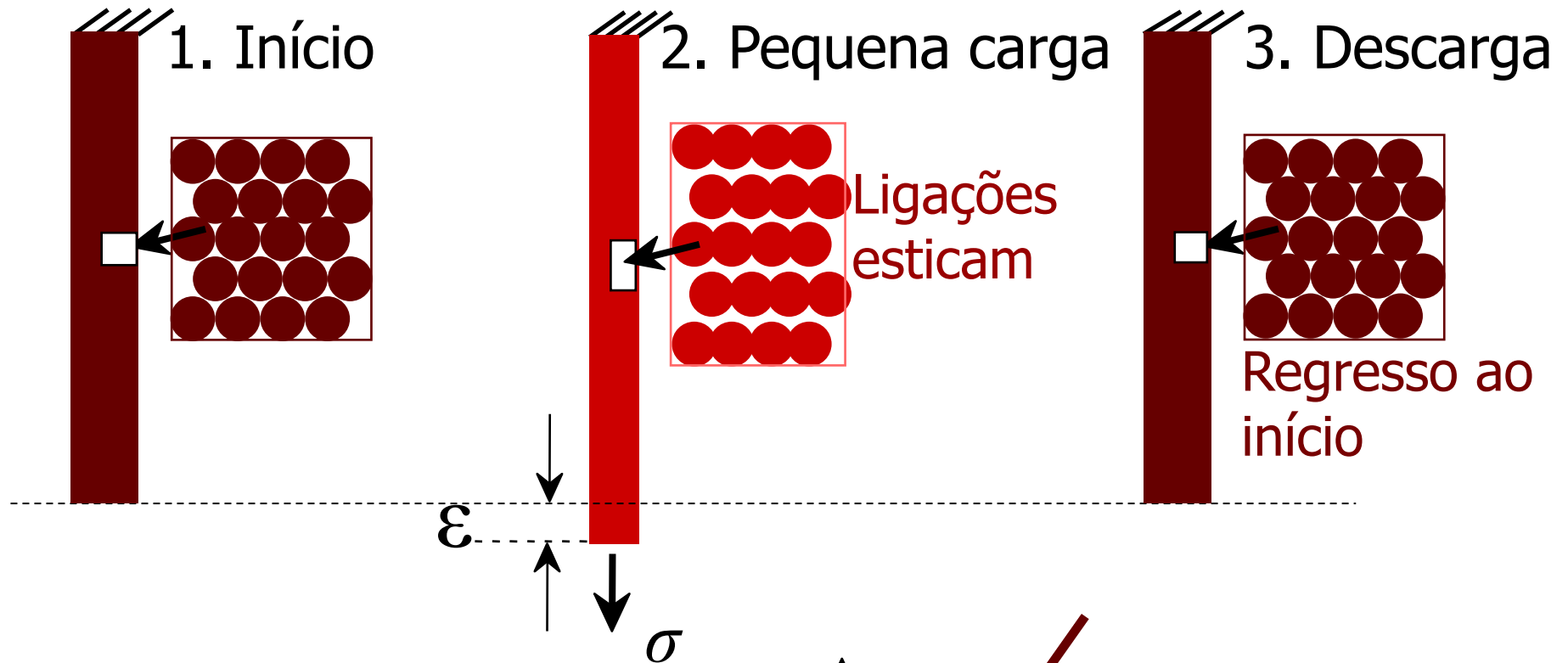
Módulo de elasticidade ou Módulo de Young

- É a razão entre a tensão aplicada e a deformação elástica resultante.
- Traduz-se na rigidez do material (resistência à deformação elástica)
- **Está relacionado directamente com as forças das ligações interatómicas**

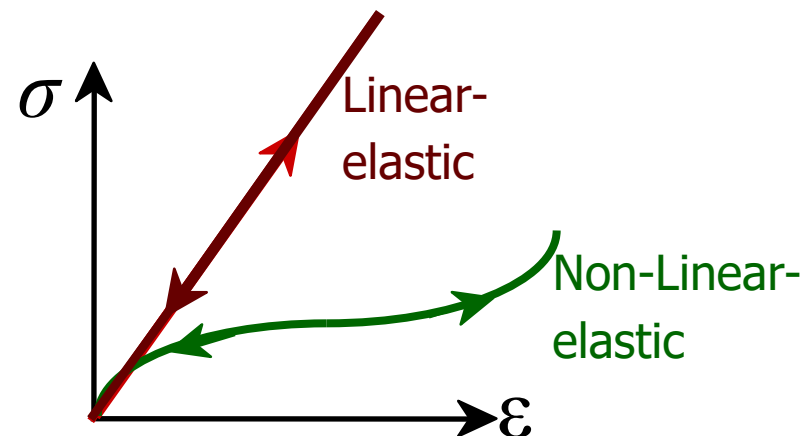


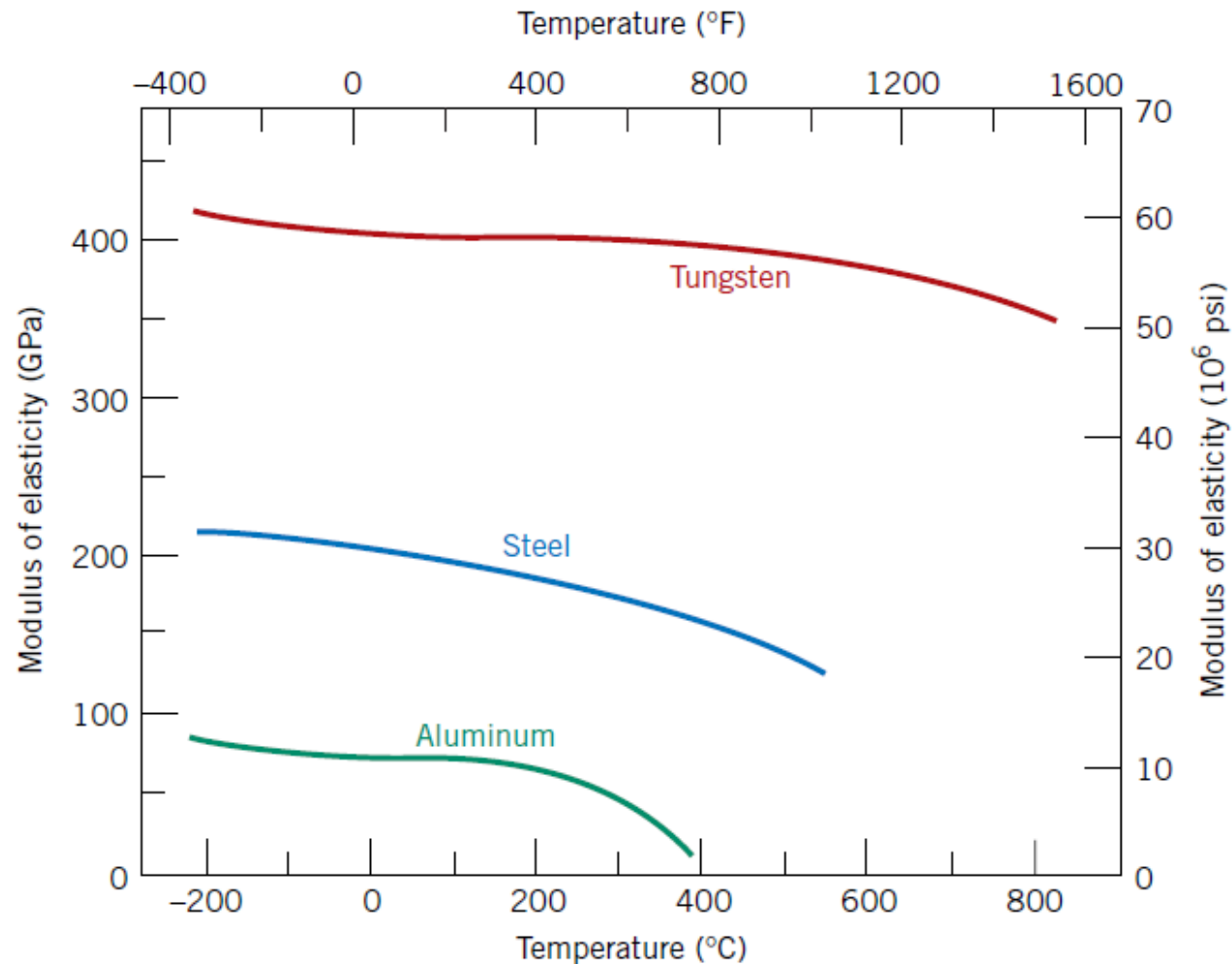
Lei de Hooke: $\sigma = E \epsilon$

Deformação Elástica



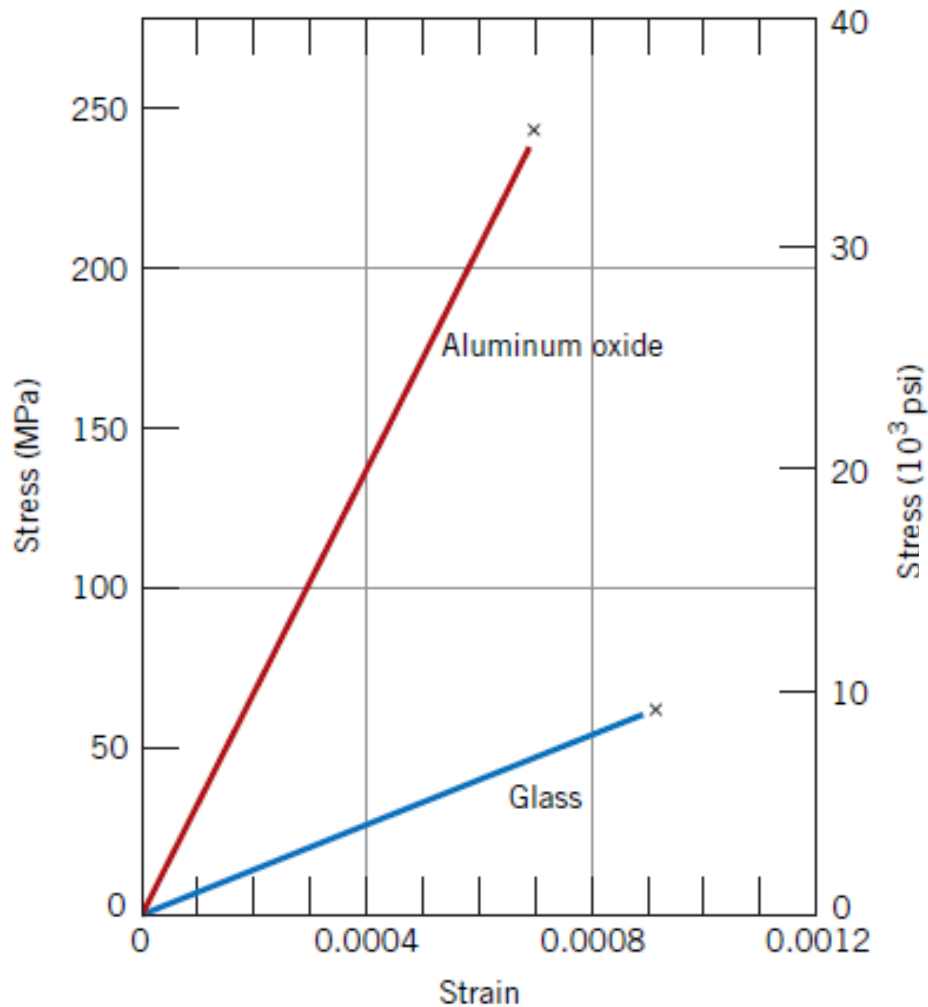
Elástica significa **reversível!**



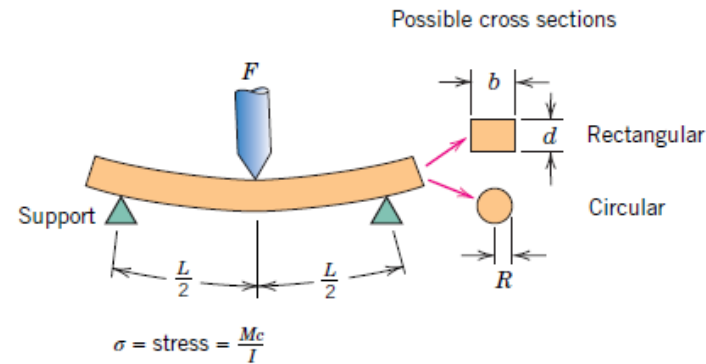


O módulo de elasticidade nos metais diminui com o aumento da temperatura, e por isso alguns processos de conformação/produção de peças metálicas são efetuados a temperaturas elevadas

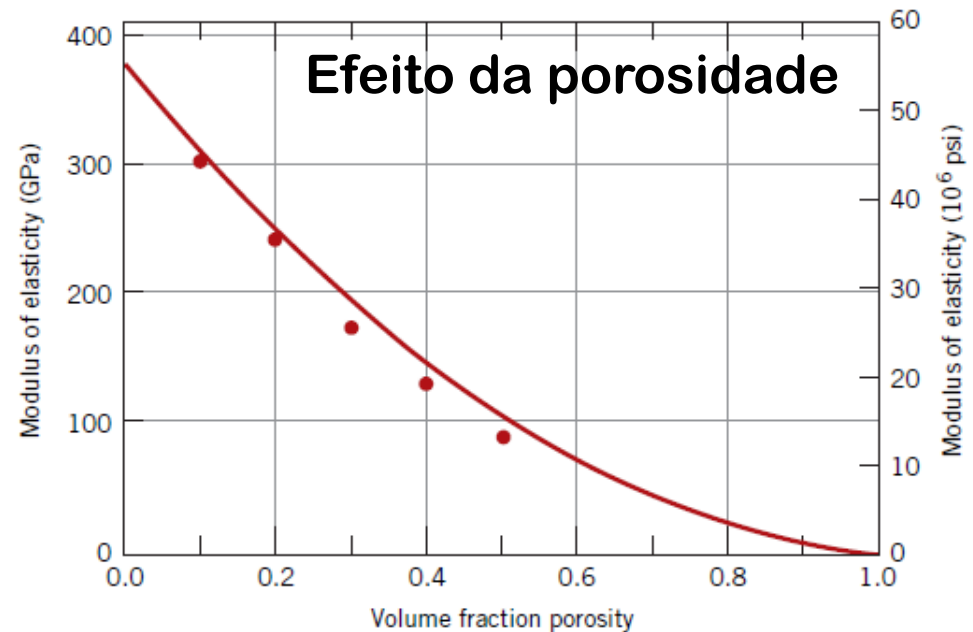
Comportamento Elástico de Cerâmicos



O vidro e a Alumina não sofrem deformação plástica antes da fractura!



where M = maximum bending moment
 c = distance from center of specimen to outer surface
 I = moment of inertia of cross section
 F = applied load



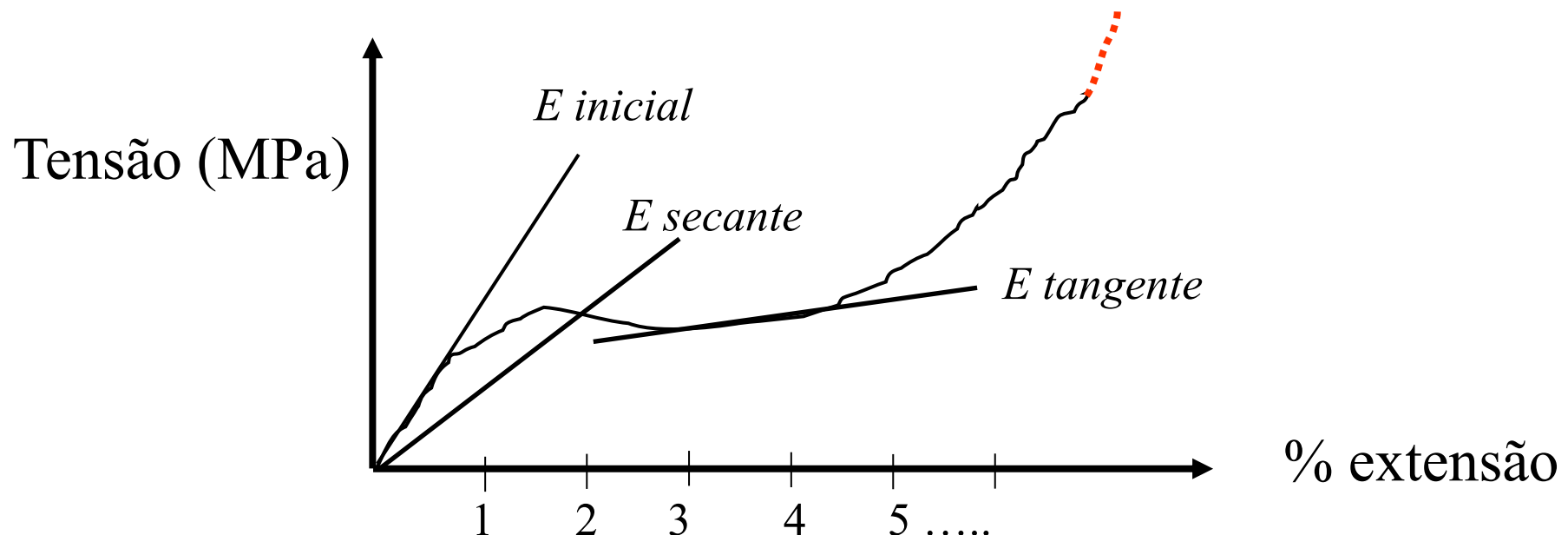
$$E = E_0(1 - 1.9P + 0.9P^2)$$

Polímeros: Módulo Young Tangente e Secante

- **Módulo E Tangente** determinado durante o ensaio.
- **Módulo E Secante** é o módulo de elasticidade para 2% de extensão.
- Ferros fundidos cinzentos é um caso semelhante de não linearidade de E

Módulo E para polímeros varia com o *tempo* e *extensão*.

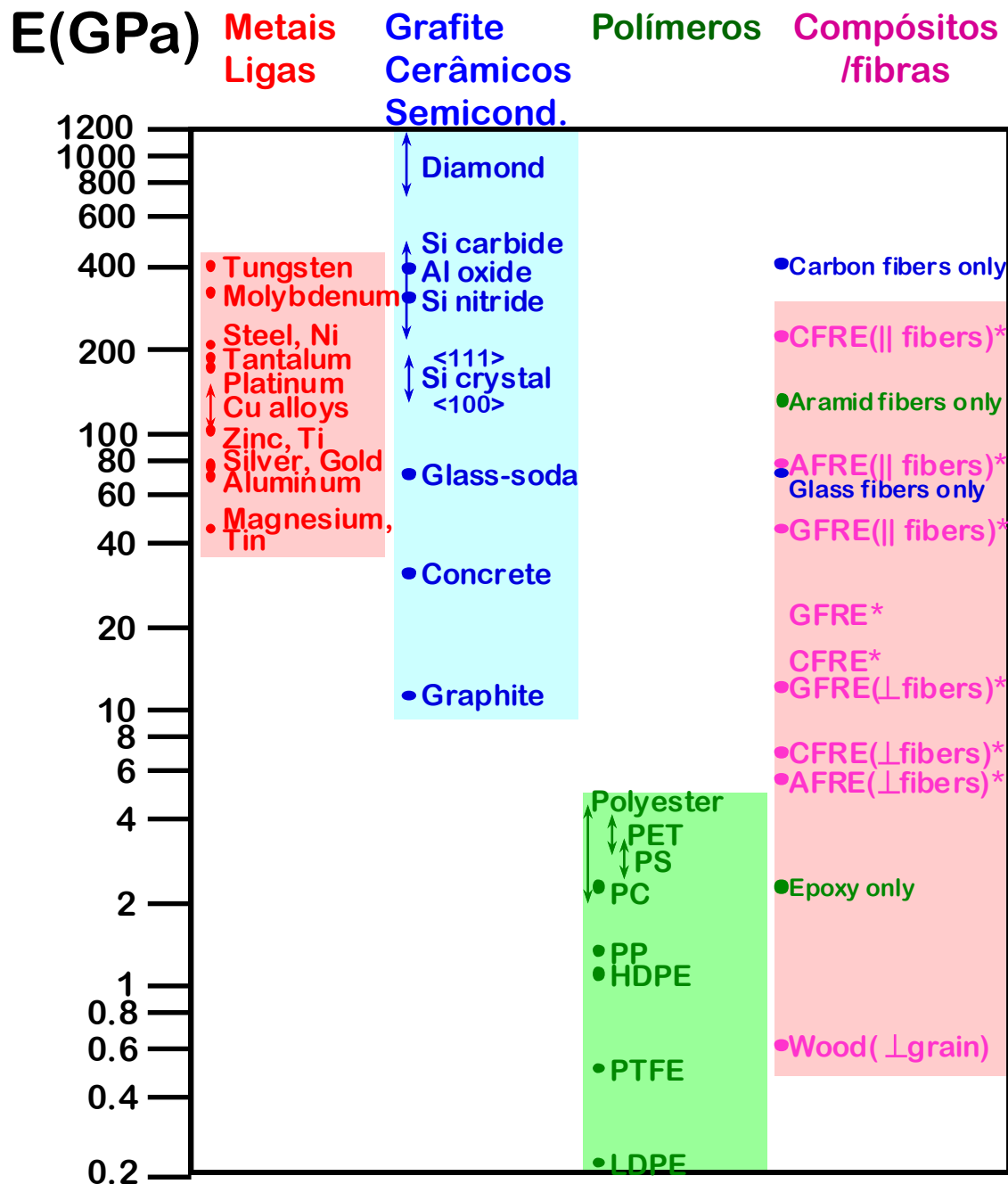
- Torna-se necessário saber $d\varepsilon/dt$
- O valor da extensão de ruptura ε_f **antes** da fractura tem que ser indicado.



Módulo de Elasticidade para alguns materiais

Quanto maior for E mais rígido é o material, i.e., menor é a deformação elástica quando aplicada uma tensão

	MÓDULO DE ELASTICIDADE [E]
	GPa
Magnésio	45
Alumínio	69
Vidro (pyrex)	70
Latão	97
Titânio	107
Cobre	110
Si (single xtal)	120-190
Níquel	207
Aço	207
Tungstênio	407
SiC (fus./sint.)	207-483
Grafite	12
Fibra C	400
Nanotubos C	1000



Módulo de Young E

$E_{\text{Cerâmicos}}$

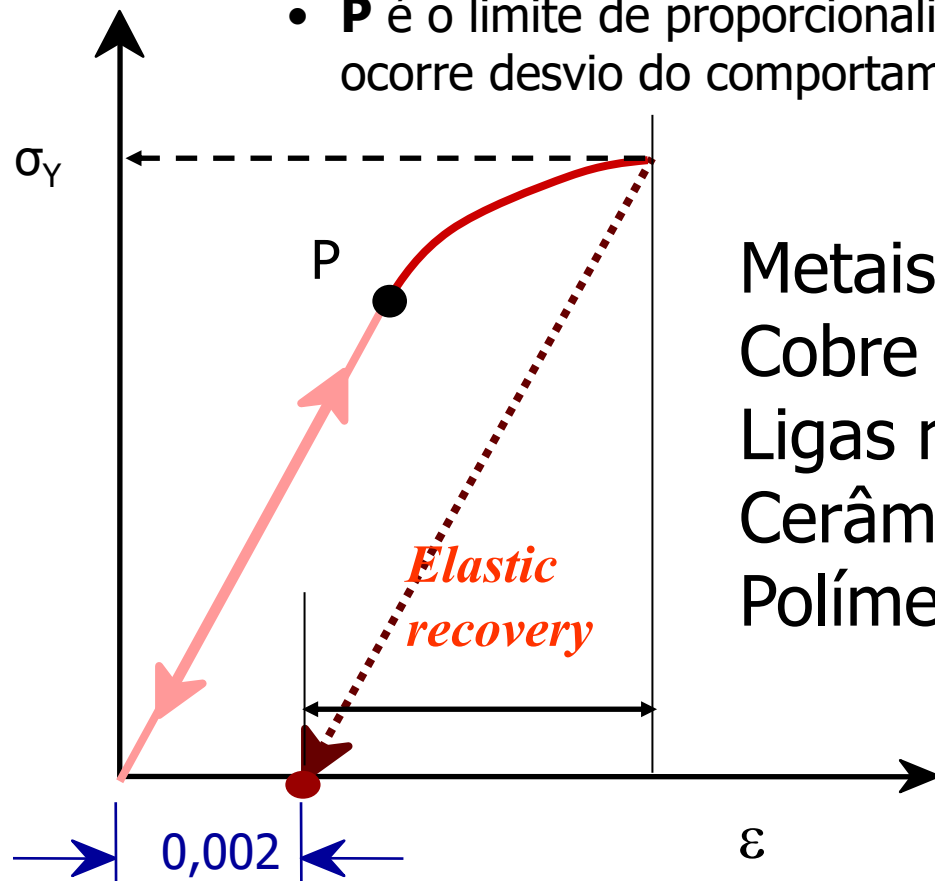
$> E_{\text{metais}}$

$>> E_{\text{polímeros}}$

Compósitos baseados em epóxidos reforçados com 60 vol% de fibras carbono alinhadas (CFRE), aramida (AFRE), ou vidro (GFRE).

Tensão de cedência, σ_Y - tensão à qual ocorre deformação plástica *detectável*

- **P** é o limite de proporcionalidade onde ocorre desvio do comportamento linear.

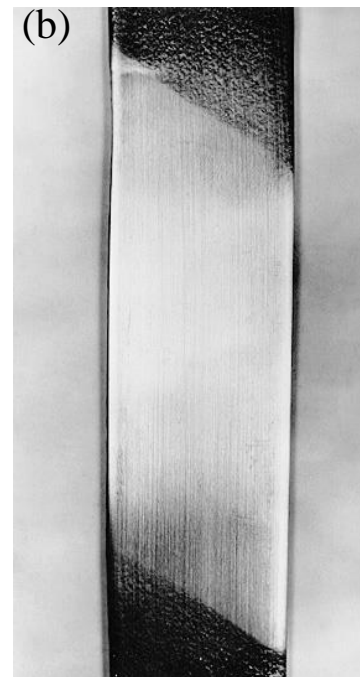
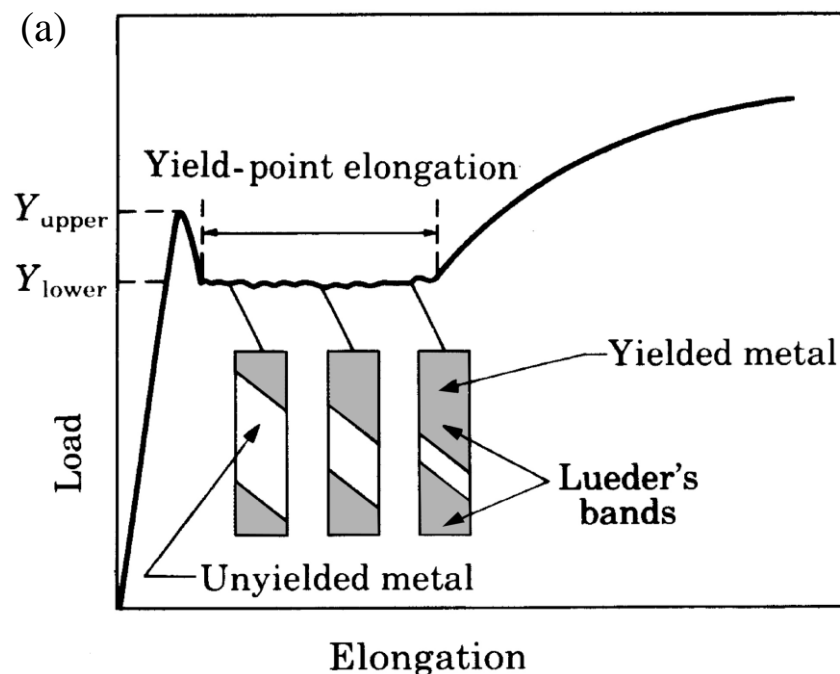


Metais estima-se para $\epsilon = 0,002 = 0,2\%$
 Cobre e suas ligas $\epsilon = 0,005$
 Ligas metálicas duras $\epsilon = 0,001$
 Cerâmicos $\epsilon = 0,001$
 Polímeros $\epsilon = 0,005$

- Em cerâmicos e compósitos geralmente é difícil medir σ_Y pois fracturam antes de atingir o ponto de cedência.

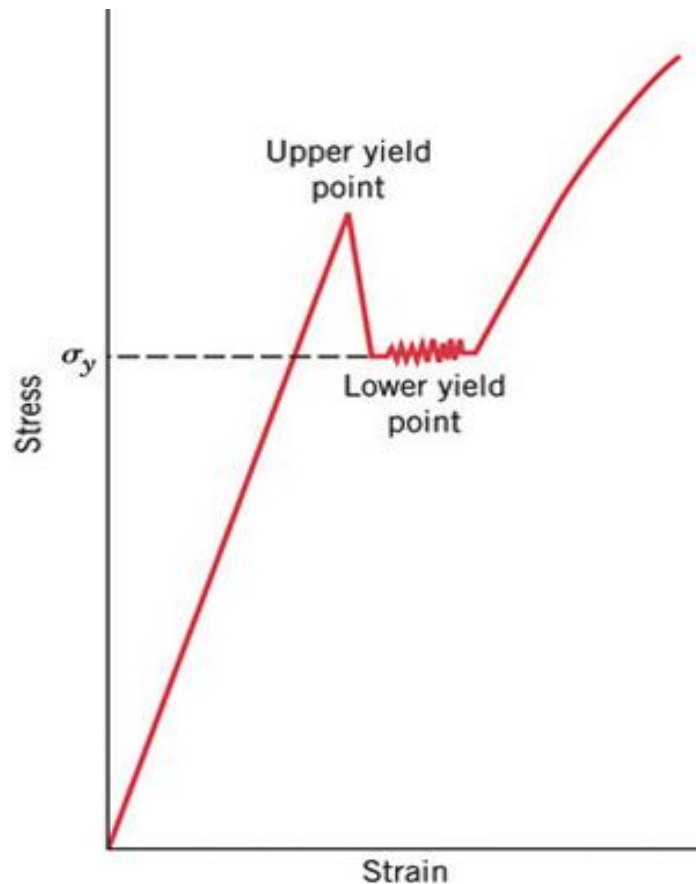
Patamar de Cedência

- Observado em alguns metais de natureza dúctil, como aços de baixo teor de carbono.
- Caracteriza-se por um grande alongamento (deformação plástica) sem acréscimo de carga devido ao movimento de deslocações.



Patamar de Cedência

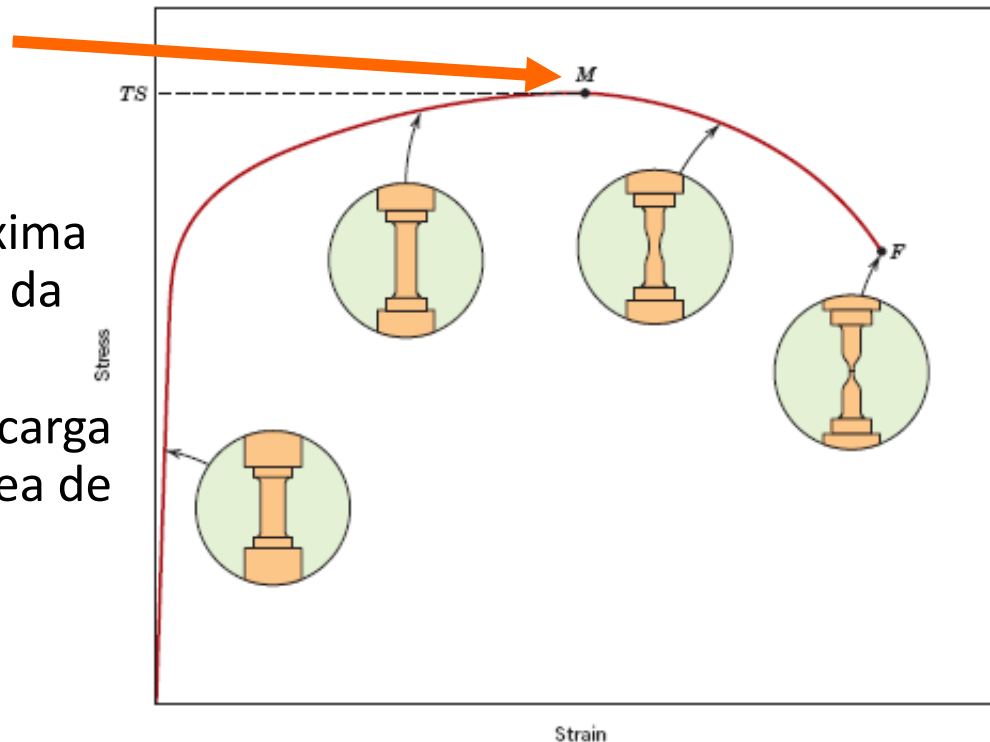
- O Patamar de cedência ocorre quando a transição elástica-plástica é abrupta.



- Nos aços este efeito é observado quando as deslocções começam a movimentar-se.
- A média do ponto de cedência inferior é considerado como o ponto de cedência, σ_y .
- O patamar não é completamente linear devido à ancoragem e desprendimento sucessivo das deslocções.

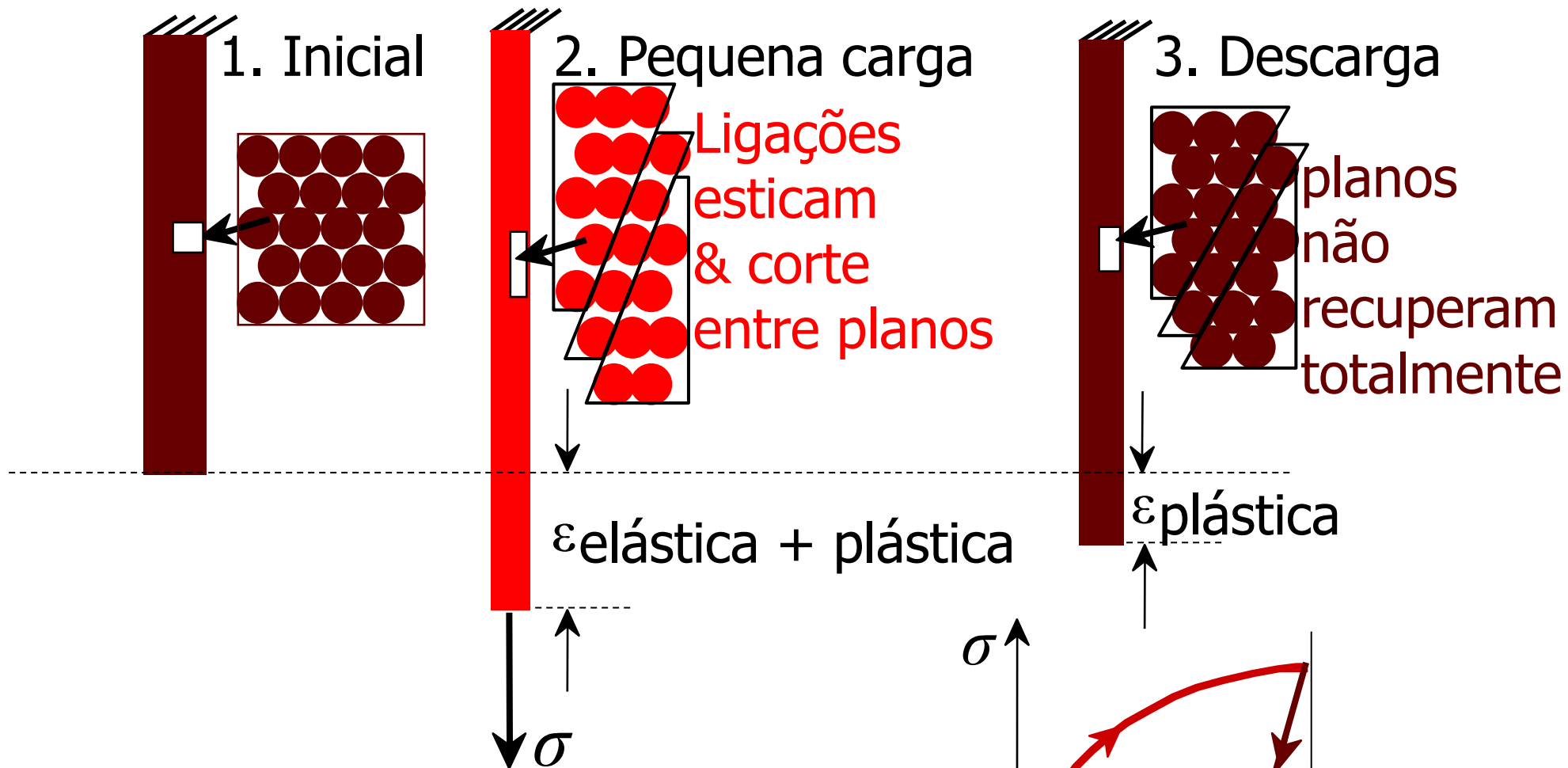
Tensão de rotura

- **Tensão nominal máxima**
- Corresponde à tensão máxima aplicada ao material antes da rotura.
- É calculada dividindo-se a carga máxima suportada pela área de secção recta inicial.

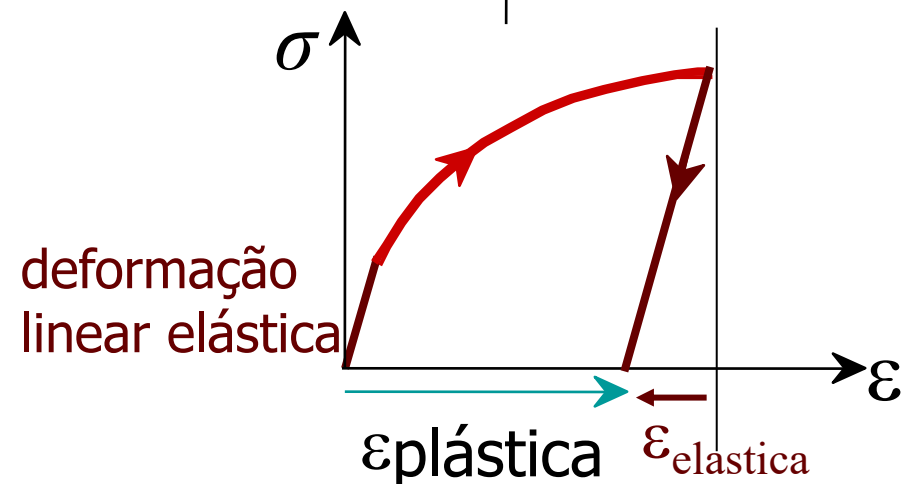


- Metais: ocorre quando começa a estrição.
- Cerâmicos: ocorre quando começa a propagação de fissuras.
- Polímeros: ocorre quando as cadeias poliméricas estão alinhadas e prestes a fracturar.

Deformação Plástica



Plástica significa **permanente!**

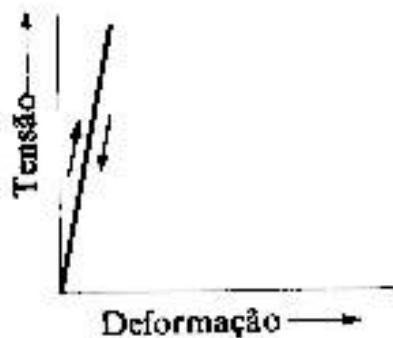


Deformação Elástica e Plástica

DEFORMAÇÃO ELÁSTICA

- Anterior à deformação plástica
- É reversível
- Desaparece quando a tensão é removida
- Obedece à lei de Hooke

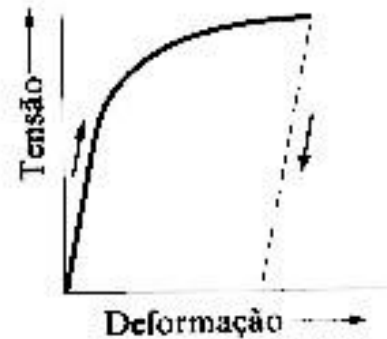
Elástica



DEFORMAÇÃO PLÁSTICA

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

Plástica



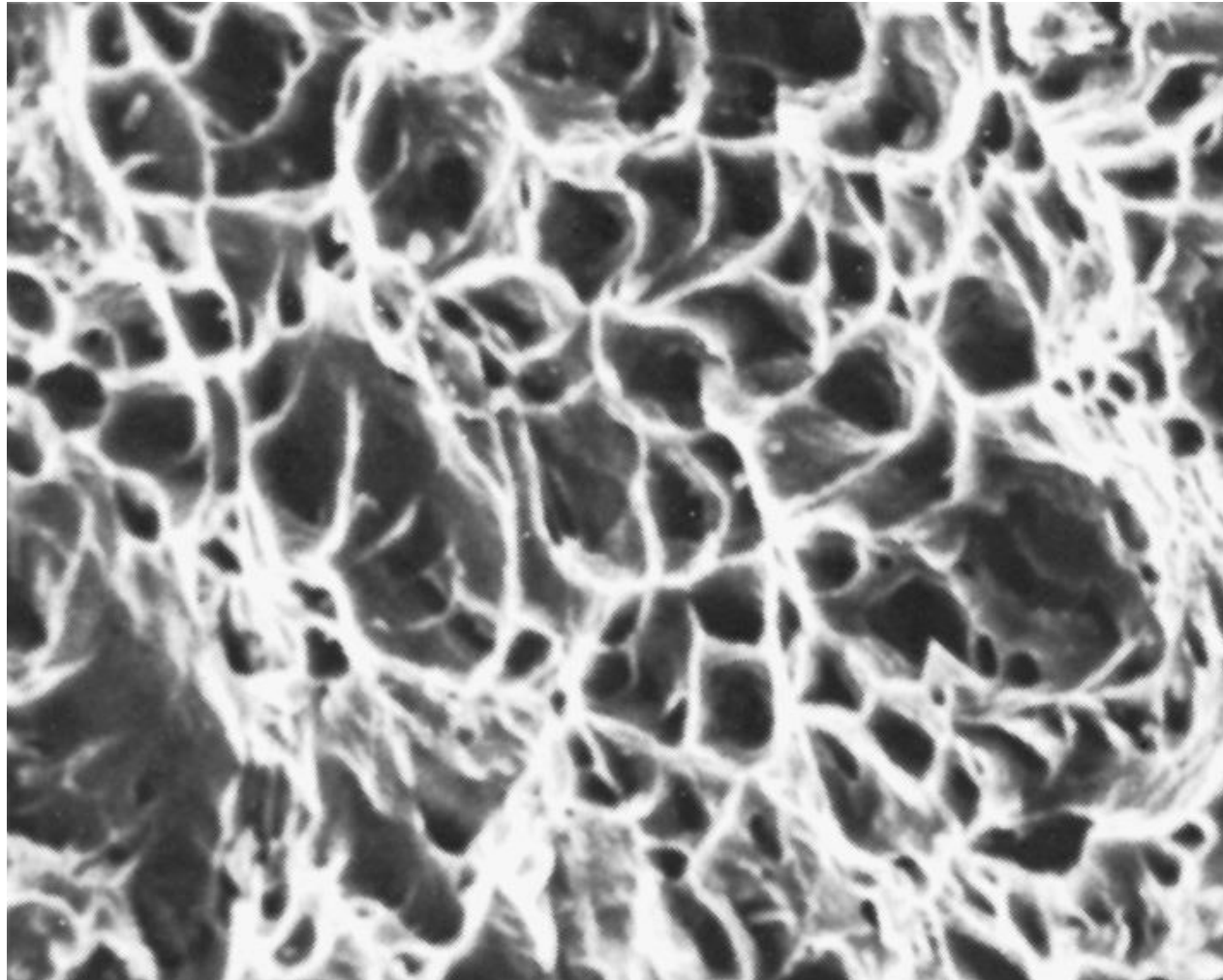
Fractura dúctil em Al (taça-e-cone)



Fractura frágil num aço macio

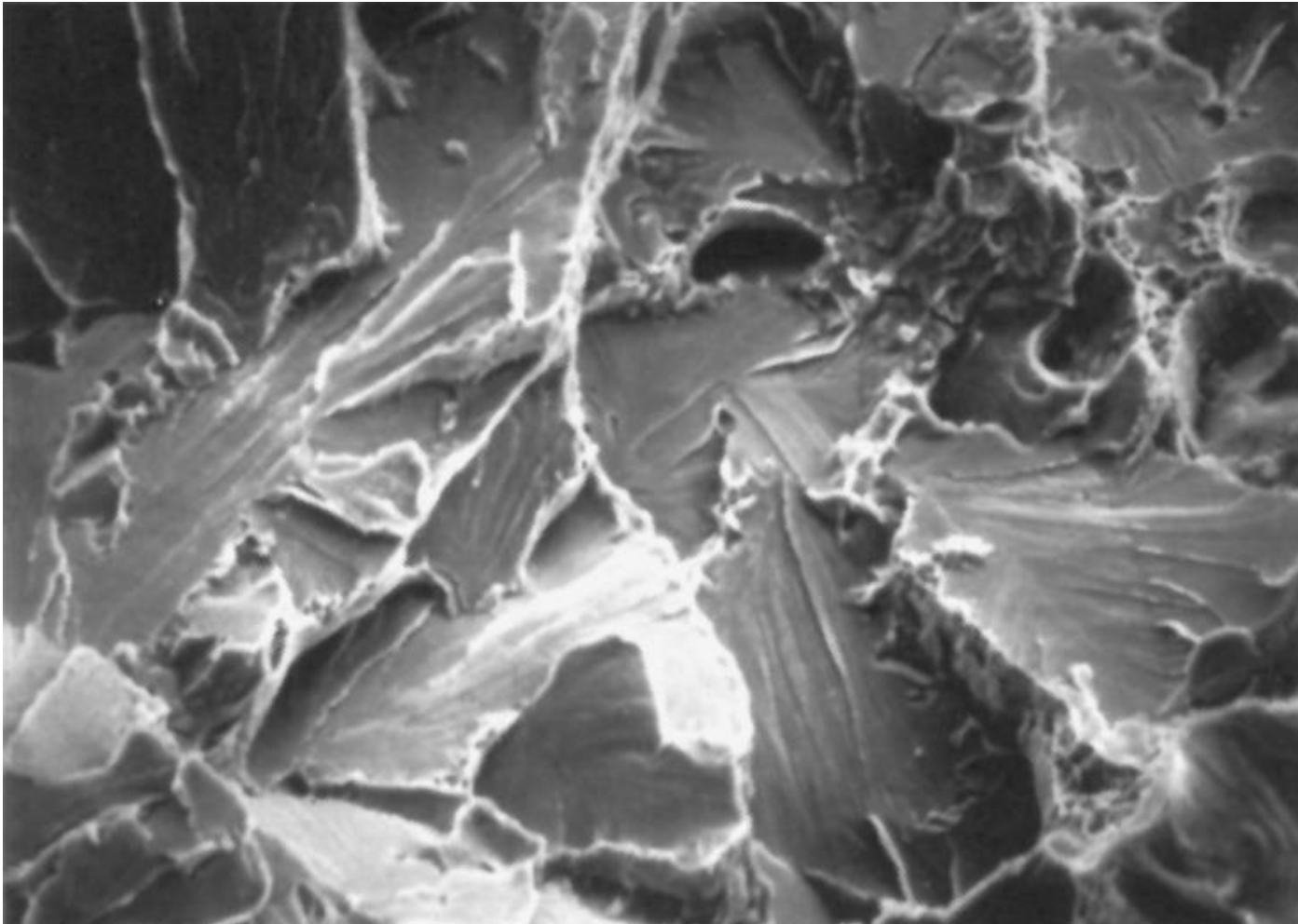


Fratura Dúctil



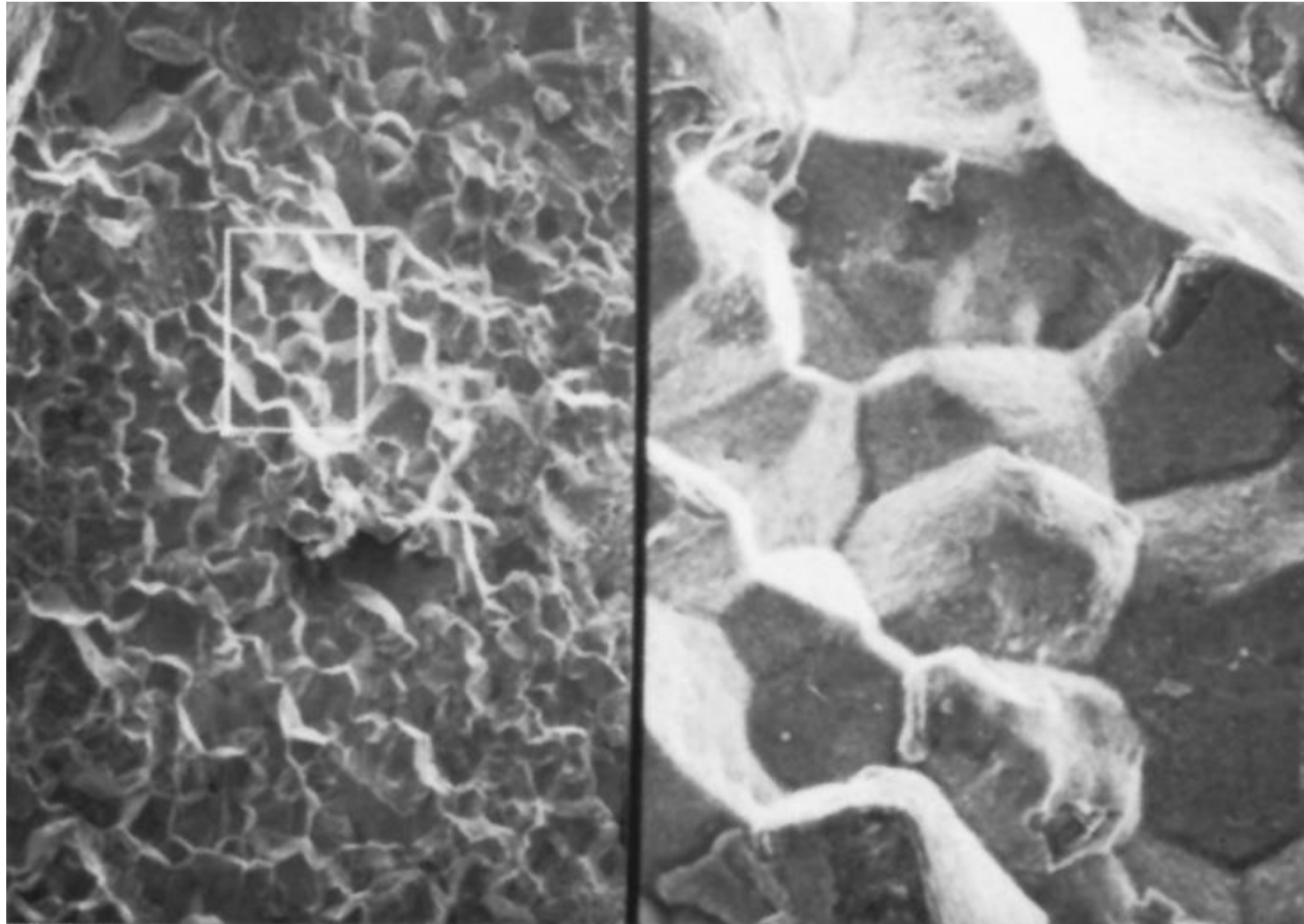
Ocorre após grande deformação plástica

Fractura frágil



Ocorre com muito pouca deformação plástica, como resultado de tensões normais a planos cristalográficos específicos.

Fratura Intergranular



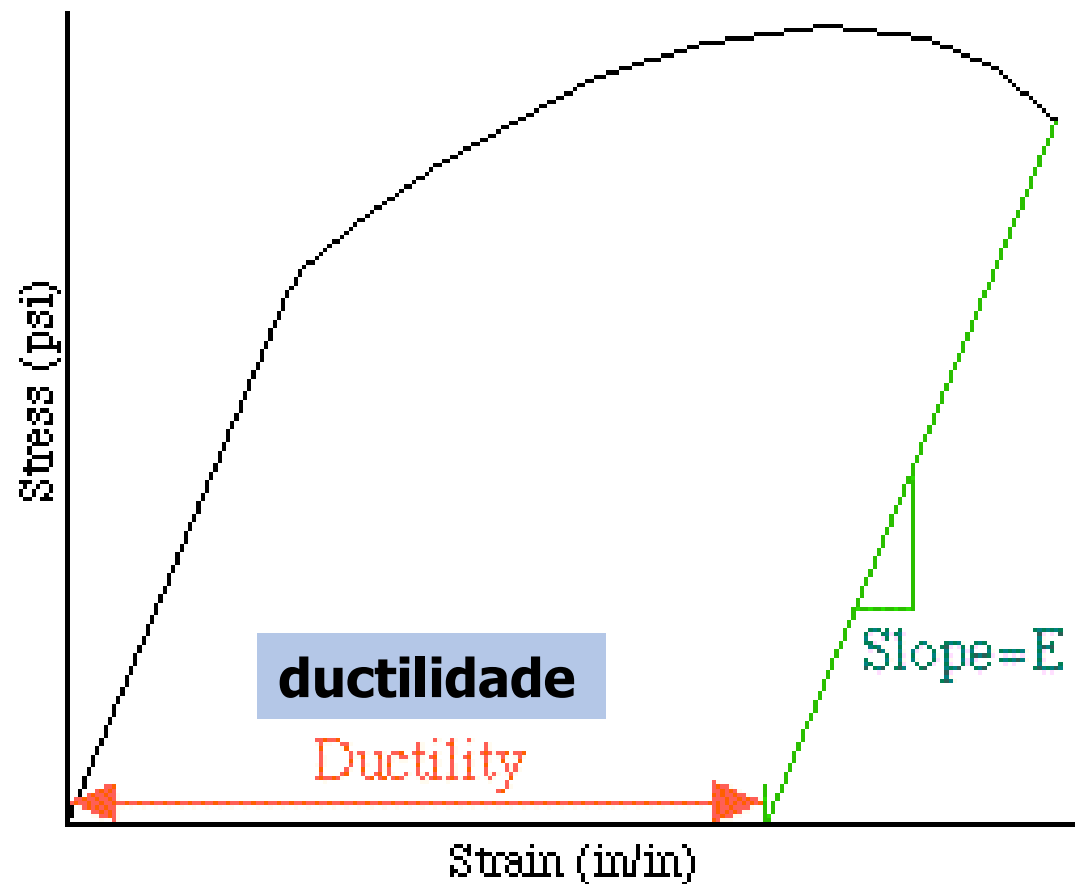
É um tipo de fratura frágil, que ocorre quando as regiões dos limites de grão são mais frágeis, devido, por exemplo, à segregação de alguns dos elementos presentes nos metais para estas zonas.

Ductilidade (em % de alongamento)

- capacidade do material se deformar plasticamente antes de fratura
- corresponde ao alongamento do material (em %) devido apenas à deformação plástica

Dúctil: $\% \varepsilon > 5\%$

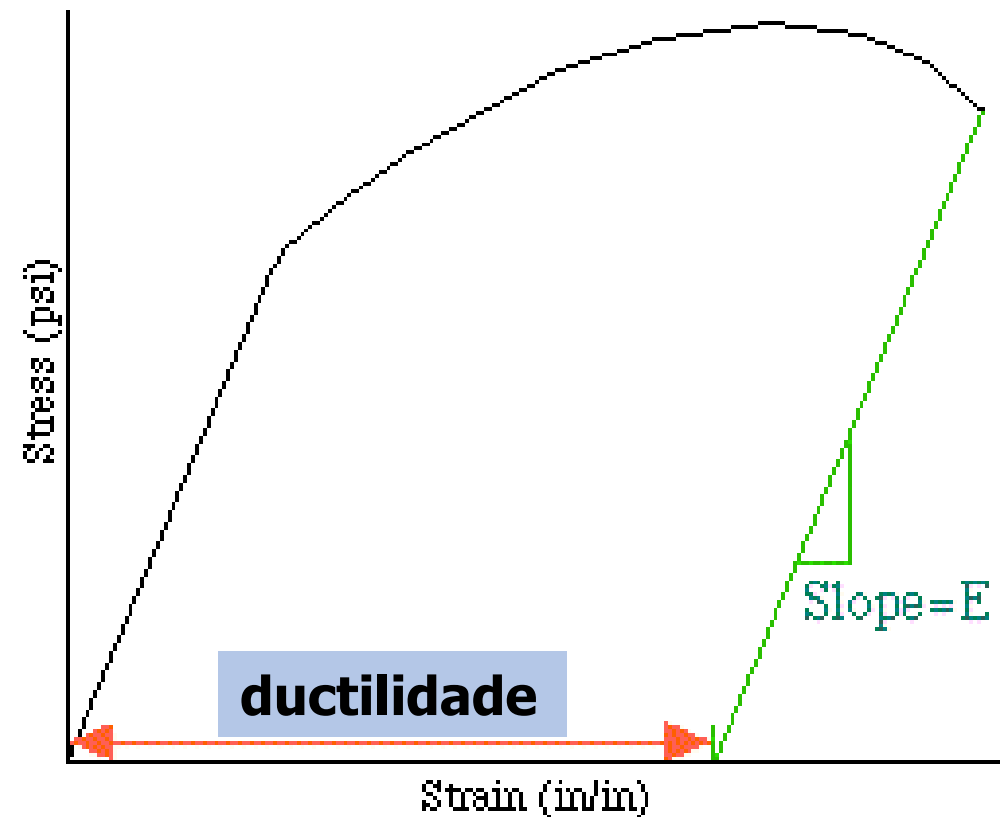
Frágil: $\% \varepsilon < 5\%$



Ductilidade (em % de redução de área)

- corresponde à diferença relativa (em %) das áreas inicial e após fratura do provete
- Após fratura temos apenas deformação plástica

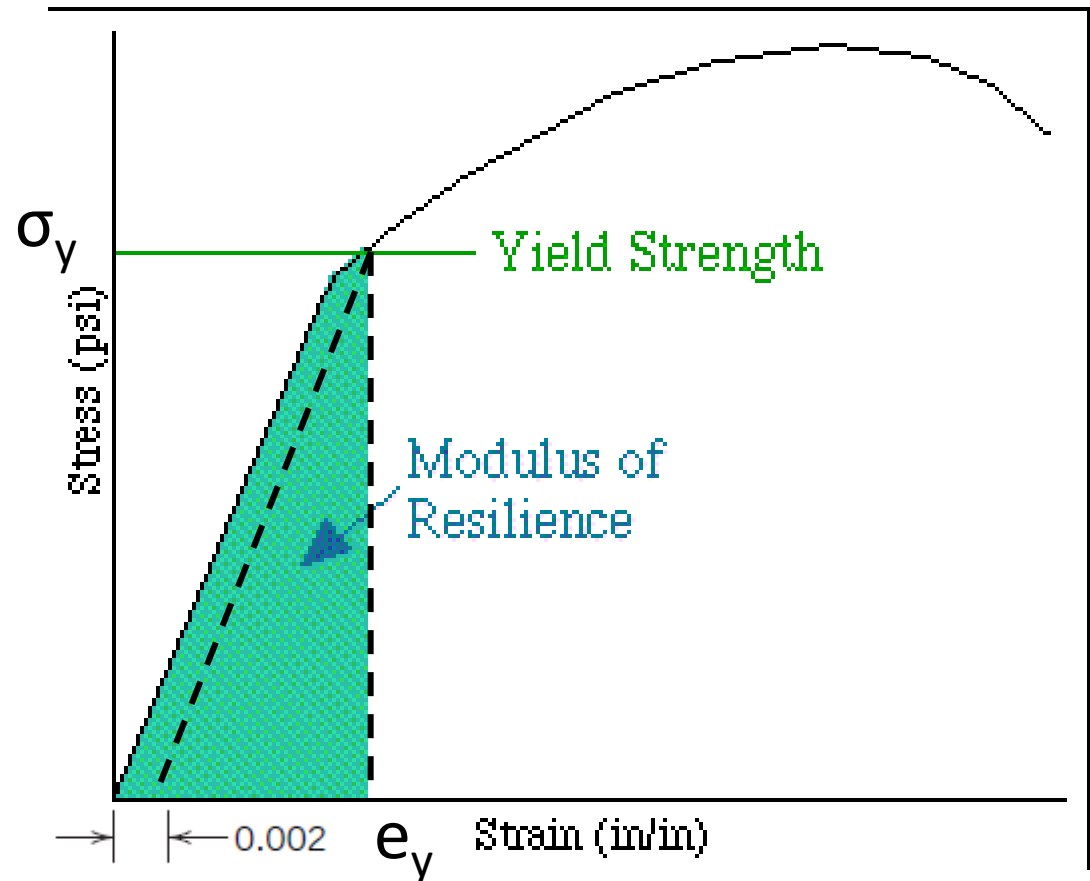
$$\% \text{ redução de área} = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100$$



Resiliência

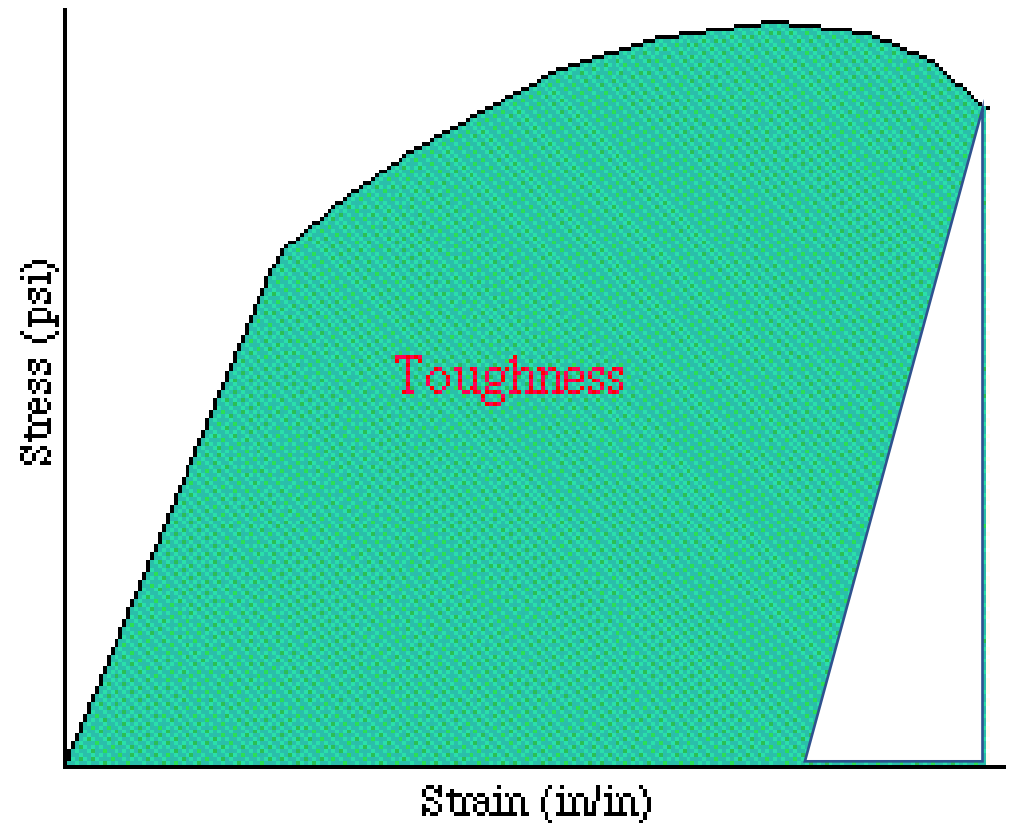
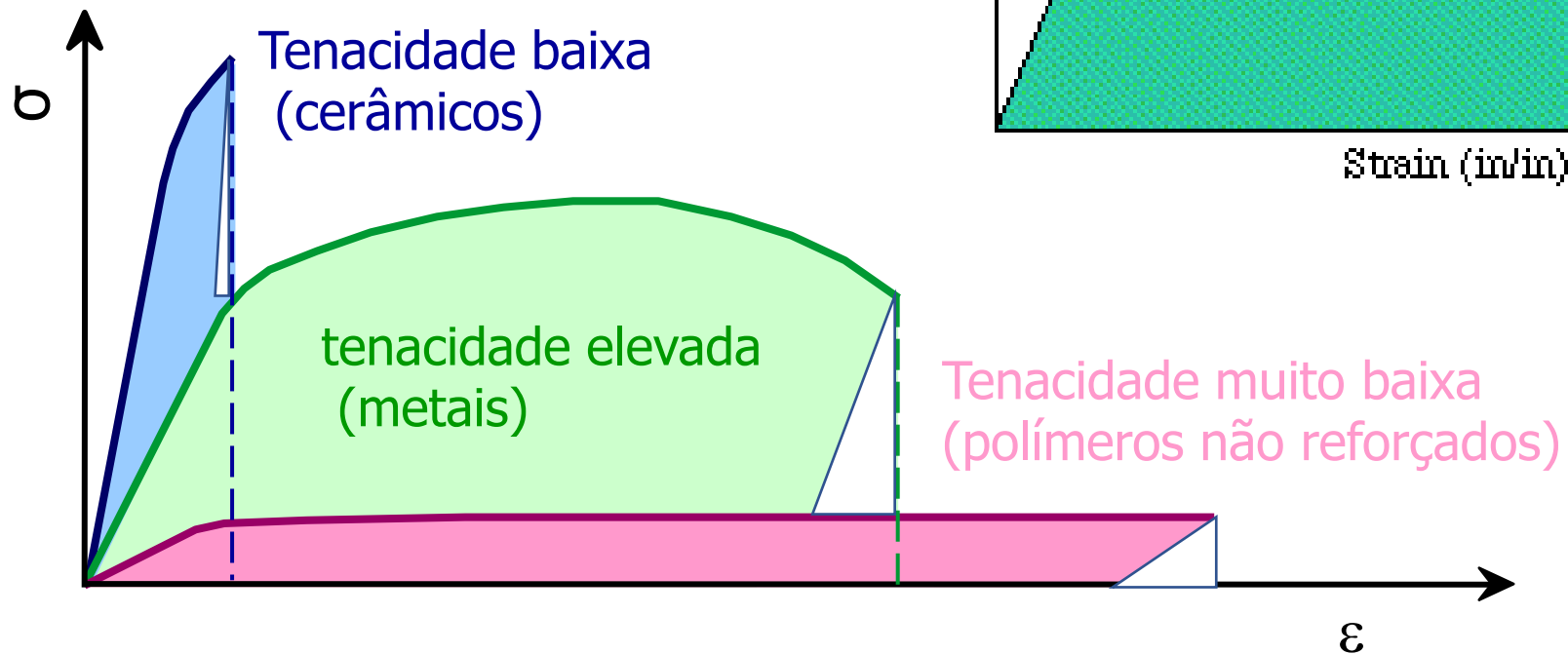
- Corresponde à capacidade do material em absorver energia quando é deformado elasticamente (área sob o domínio elástico)
- Materiais resilientes são aqueles que têm elevado limite de elasticidade e baixo módulo de elasticidade E (como os materiais utilizados para molas)

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

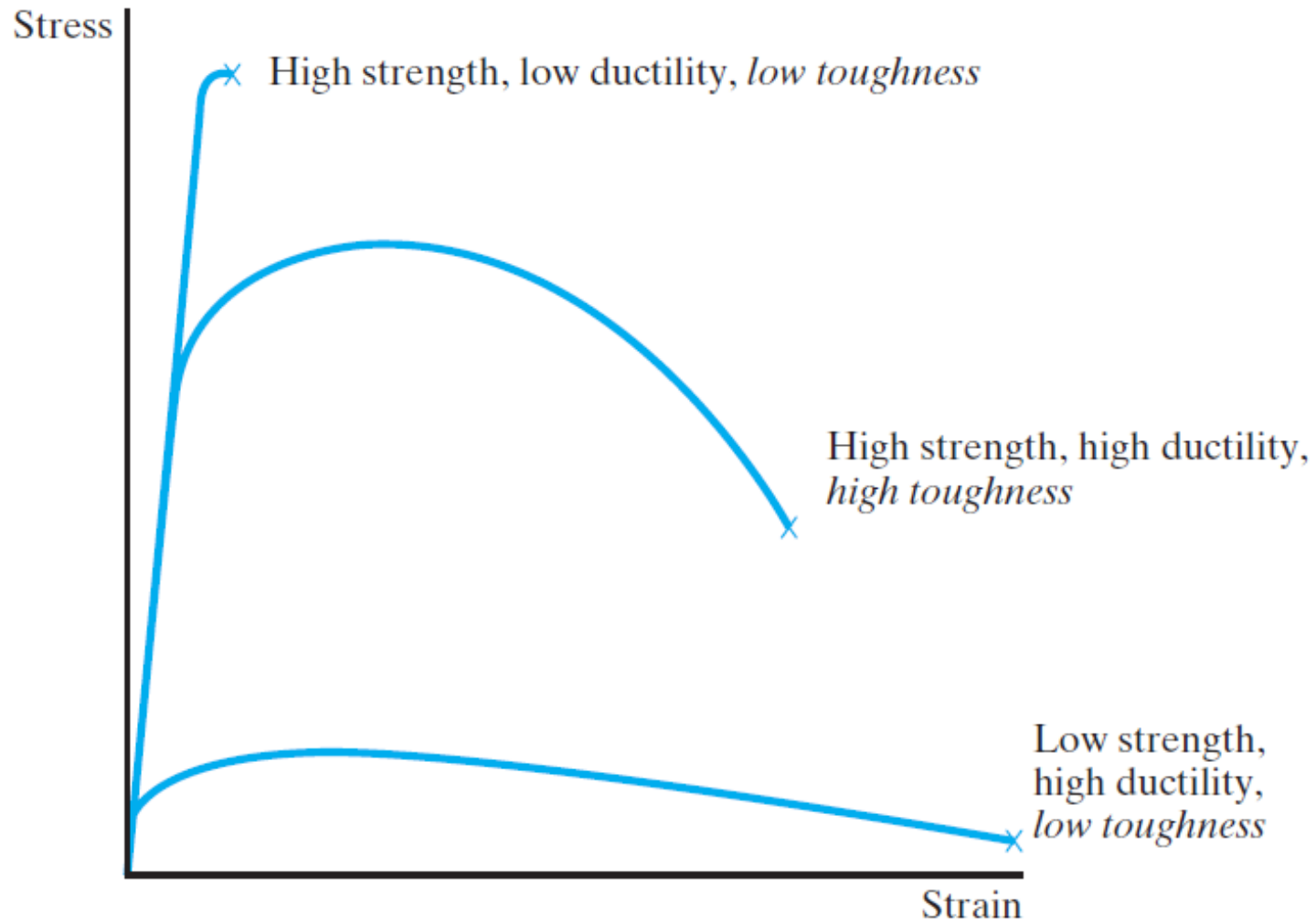


Tenacidade

- Corresponde à capacidade do material em absorver energia por deformação plástica até à sua ruptura.

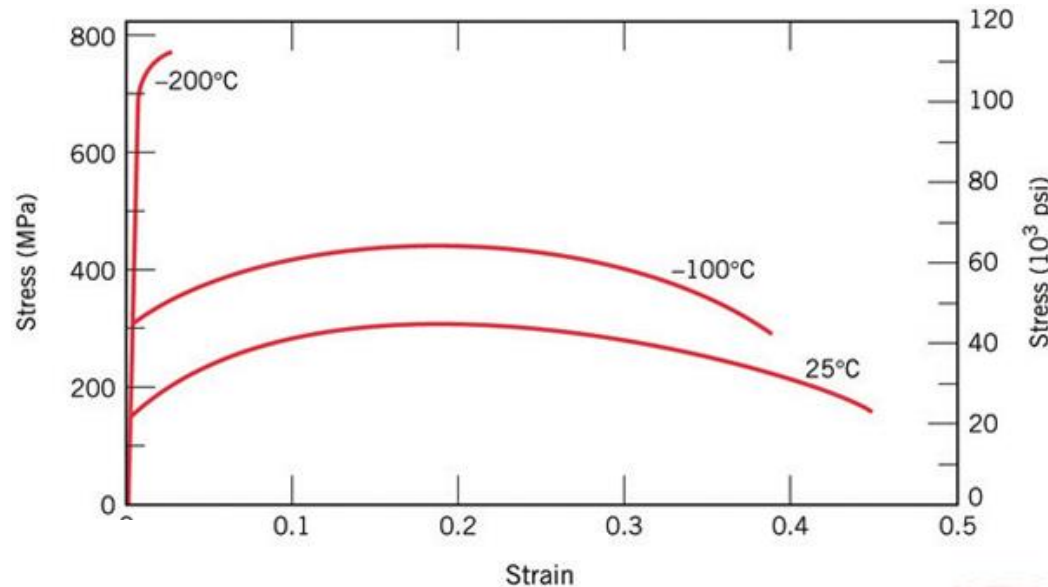


Relação entre ductilidade e tenacidade



Efeito da Temperatura

A maioria dos metais é dúctil à temperatura ambiente ou superior mas podem tornar-se frágeis a baixas temperaturas

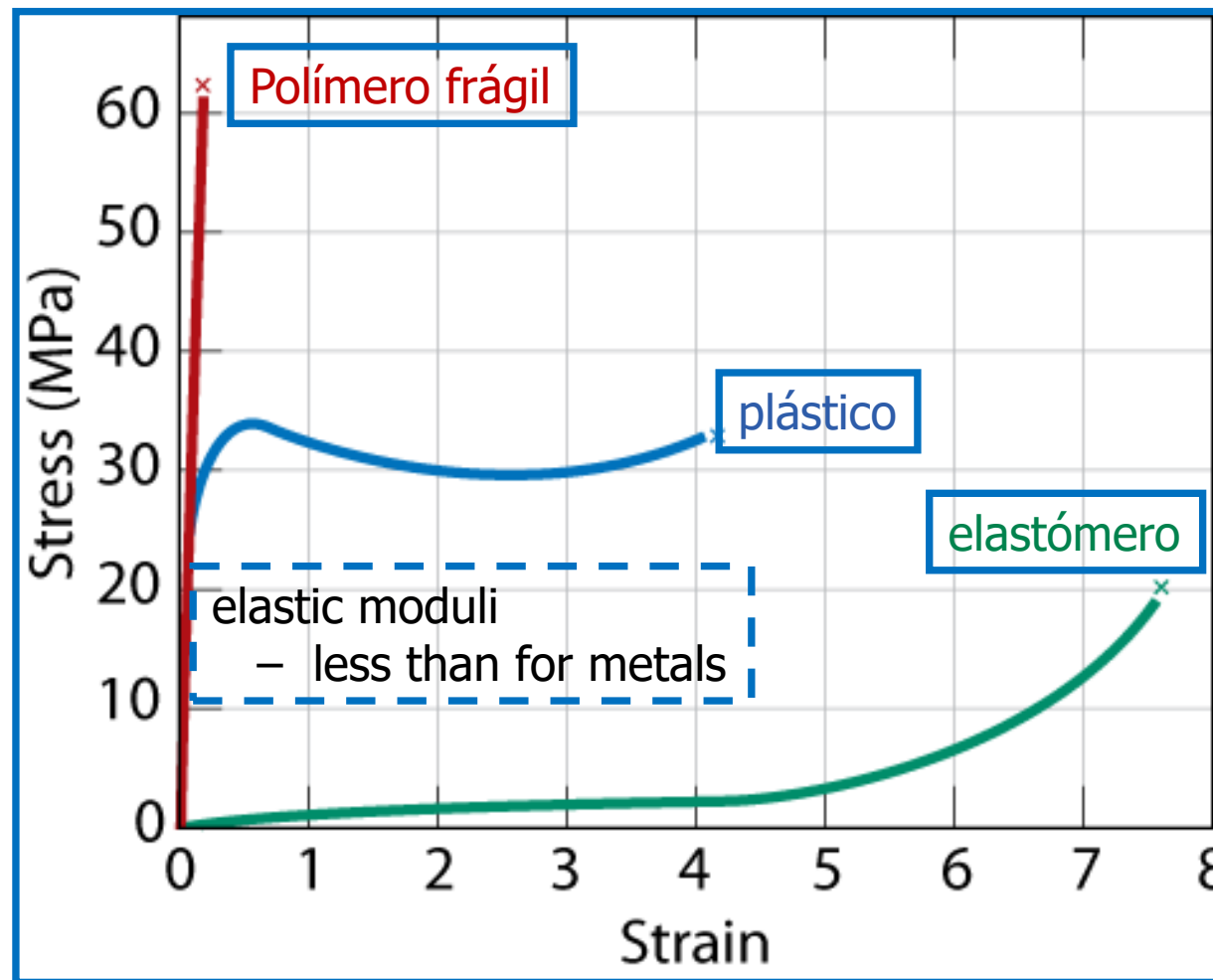


Fractura dúctil em Al
(taça-e-cone)



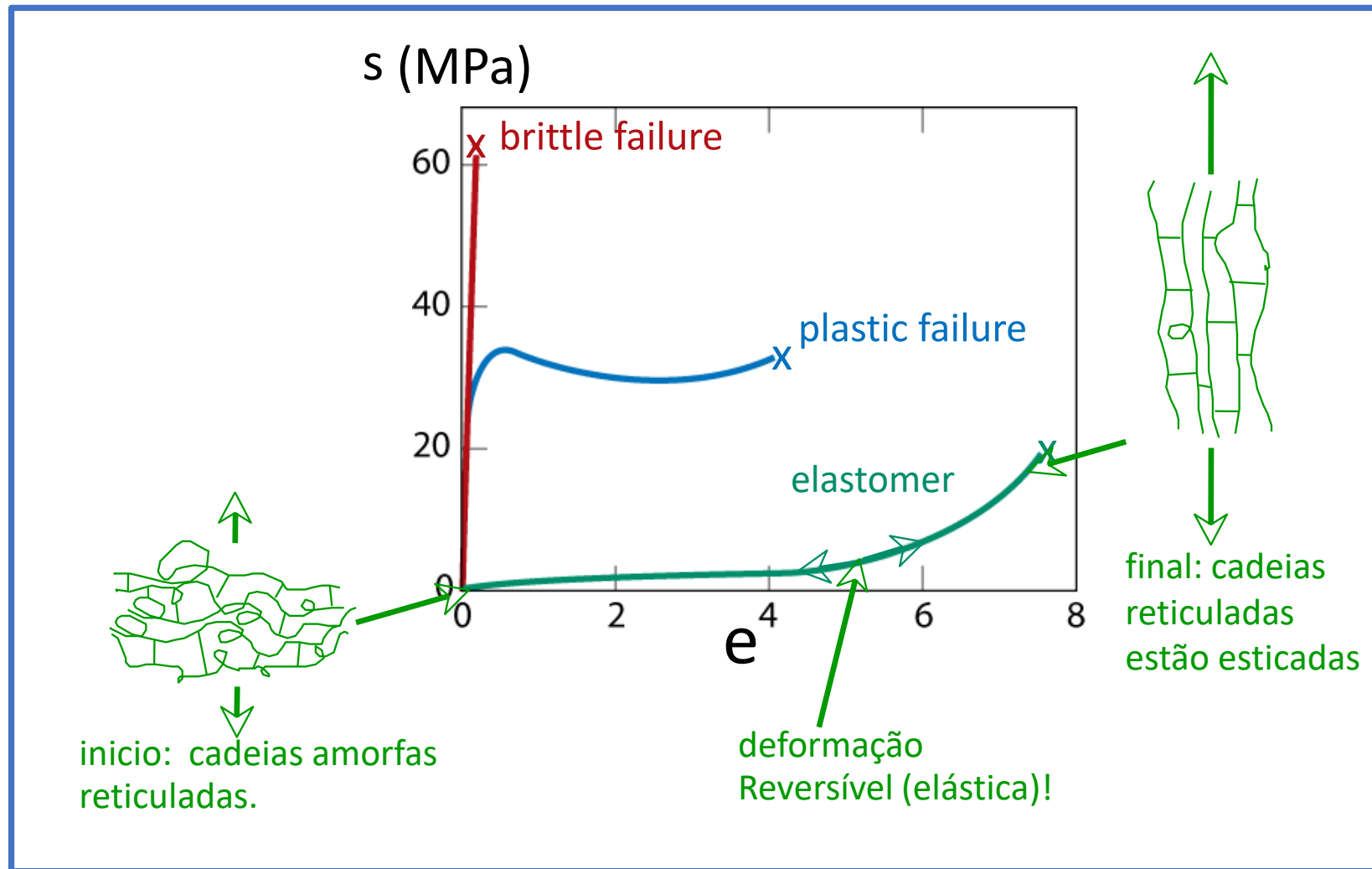
Fractura frágil
num aço macio

Tensão-Extensão em Polímeros

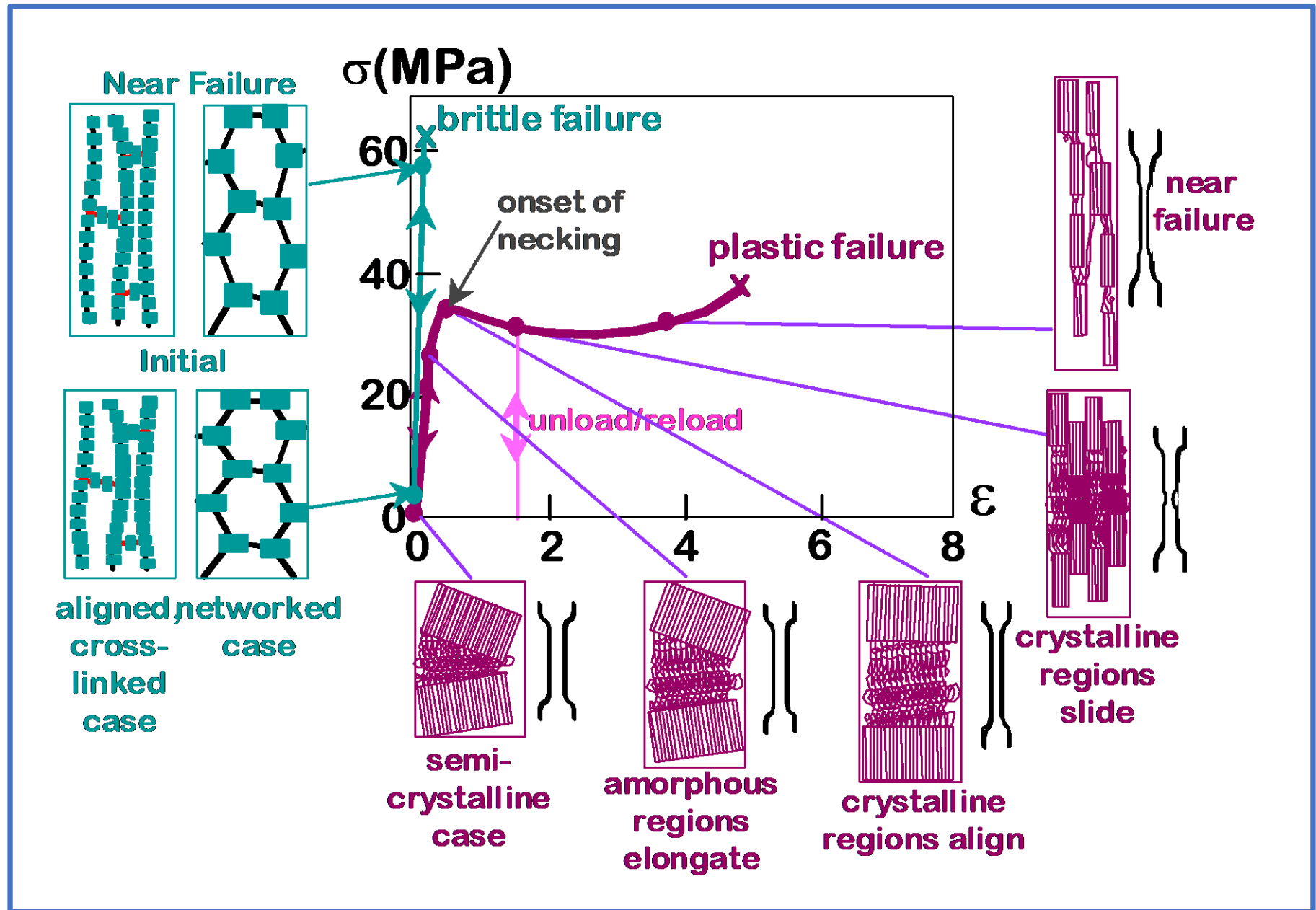


- resistência à fractura dos polímeros $\sim 10\%$ da dos metais.
- alongamento percentual para polímeros $> 1000\%$ (para a maioria dos metais $< 10\%$).

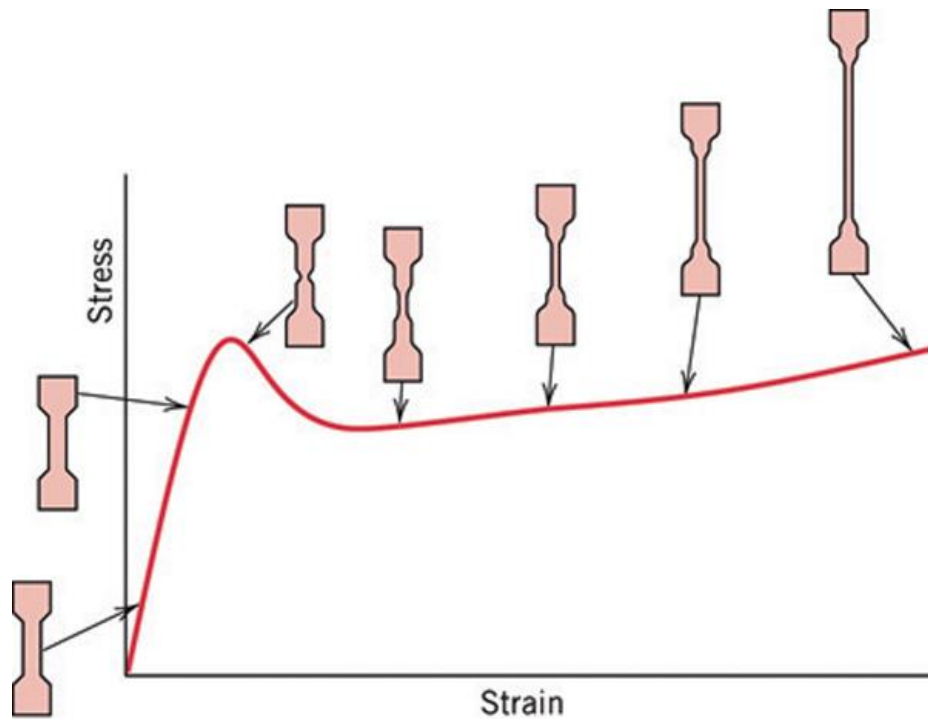
Mecanismos de deformação – Elastômeros



Mecanismos de deformação – Frágil e Plástica

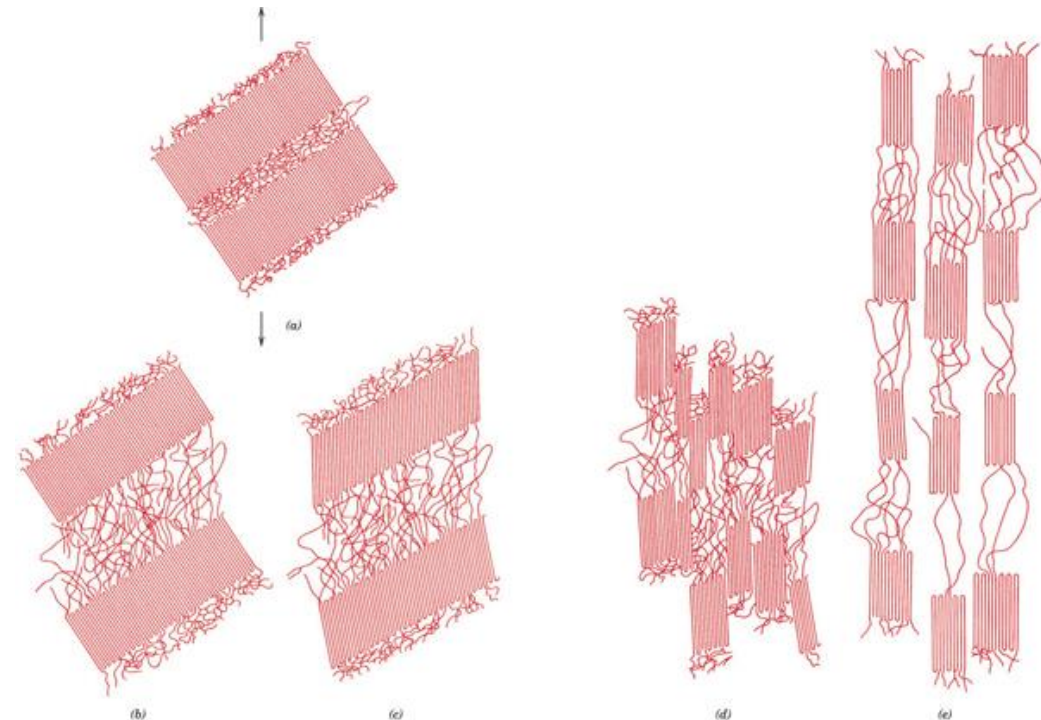


Tensão-Extensão em Polímeros



- Estricção aparece ao longo do provete após a tensão de cedência

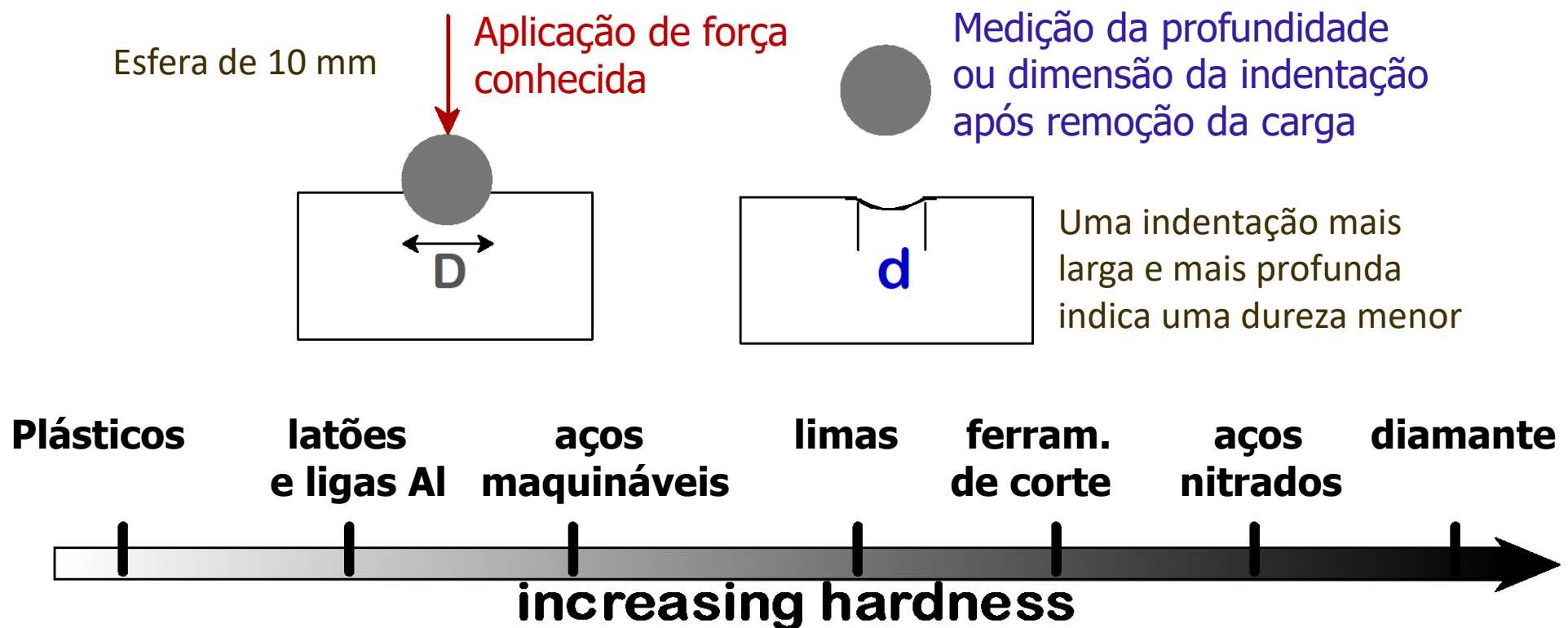
- Mecanismo diferente ao dos metais. É devido ao alinhamento dos cristalitos ou cadeias poliméricas.



Dureza

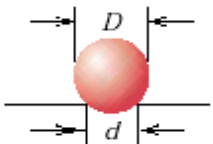
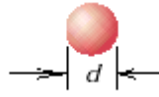
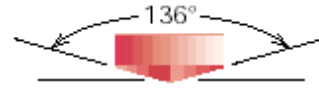

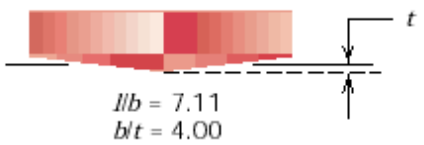
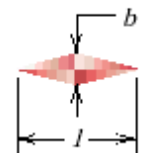
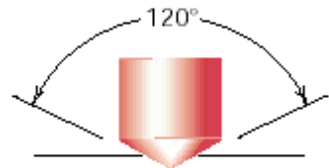
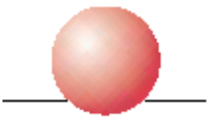


Ensaio não destrutivo relacionável
com a resistência à tração

- mede a resistência do material à deformação plástica localizada provocada pela indentação permanente de uma superfície.
- maior dureza significa \longrightarrow maior resistência à deformação plástica ou fissuração em compressão.



Ensaio de dureza

Table 7.4 Hardness Testing Techniques

Test	Indenter	Shape of Indentation		Load	Formula for Hardness Number ^a
		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	<div> Diamond cone $\frac{1}{16}, \frac{1}{8}, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}$ in. diameter steel spheres </div>	 	 	<div> 60 kg 100 kg 150 kg </div> } Rockwell <div> 15 kg 30 kg 45 kg </div> } Superficial Rockwell	

^a 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.

A resistência à tração (UTS) de um metal é proporcional ao valor de dureza (HB)

Para a maioria dos aços verifica-se:

$$UTS \text{ (MPa)} = 3.45 \times HB$$

