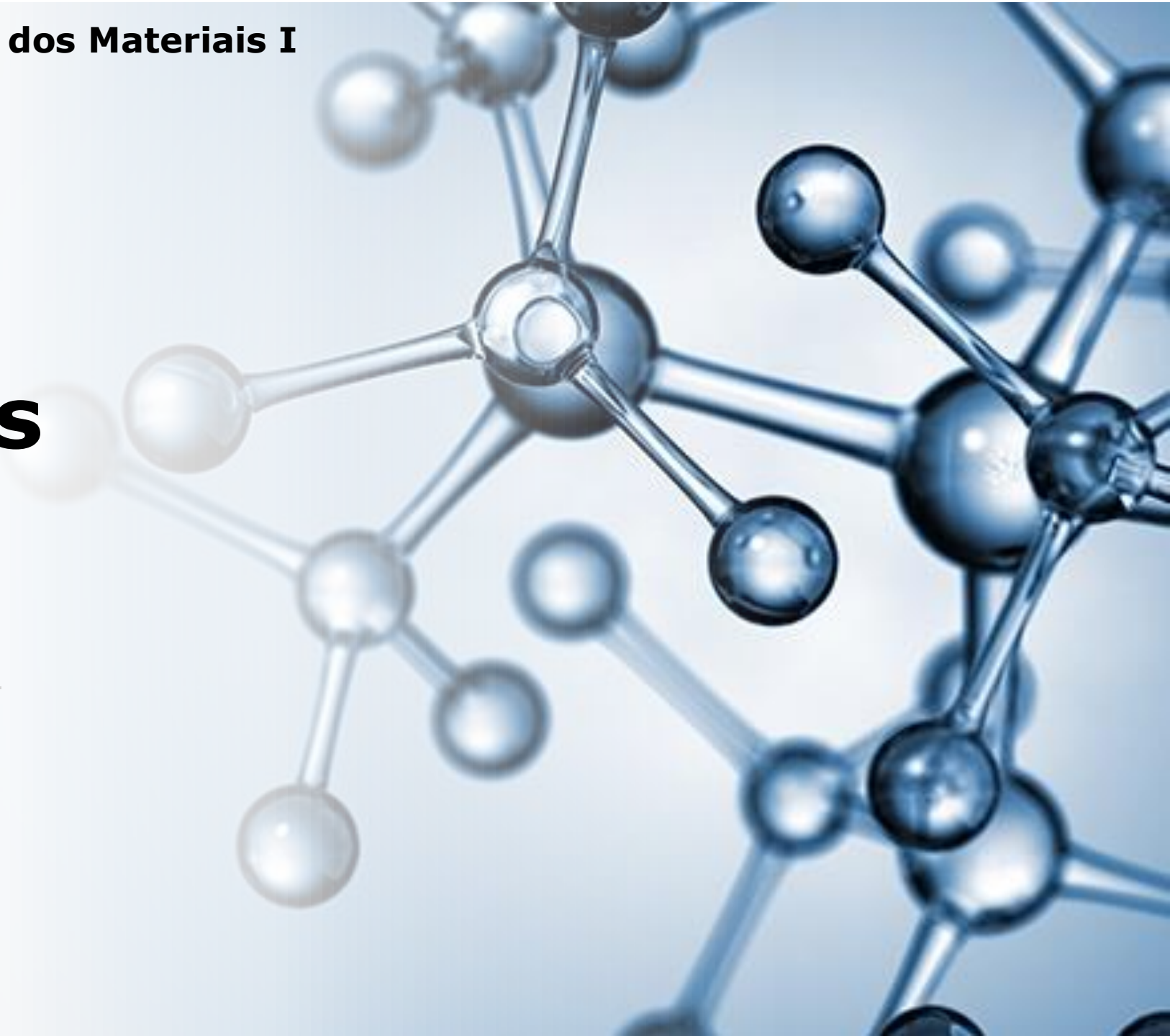


# Aula 4: Propriedades Mecânicas dos metais

---

Prof. Fernando Sabino

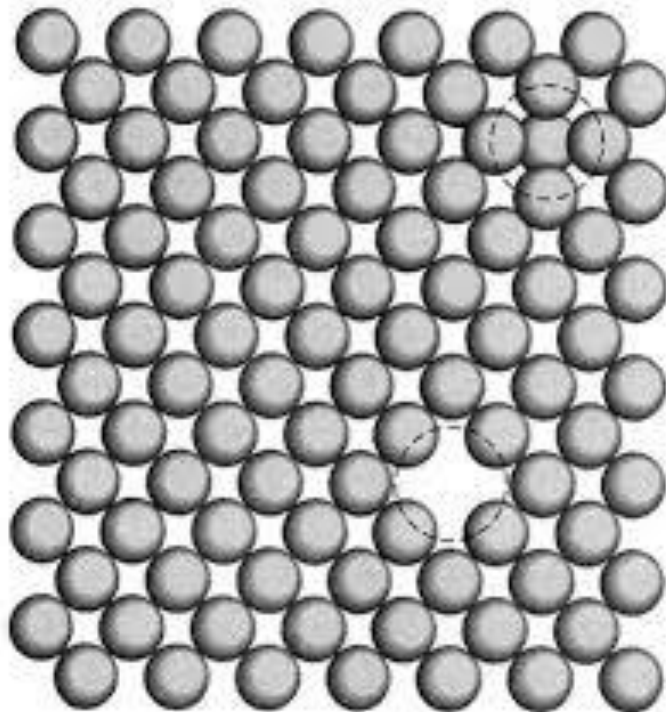
Email: [fpsabino@usp.br](mailto:fpsabino@usp.br)



# Última aula...

## 1. Defeitos pontuais

1. Vacâncias, interstícios, anti-sítions, substitucional, Frenkel...
2. Calcular a concentração de defeitos.
3. Raio de impurezas nas células cristalinas.



# Última aula...

## 1. Defeitos pontuais

1. Vacâncias, interstícios, anti-sítions, substitucional, Frenkel...
2. Calcular a concentração de defeitos.
3. Raio de impurezas nas células cristalinas.

## 2. Difusão e leis de Frik

$$J = -D \frac{dC}{dx}$$

$$\frac{dc}{dt} = D \frac{d^2c}{dx^2}$$

# Última aula...

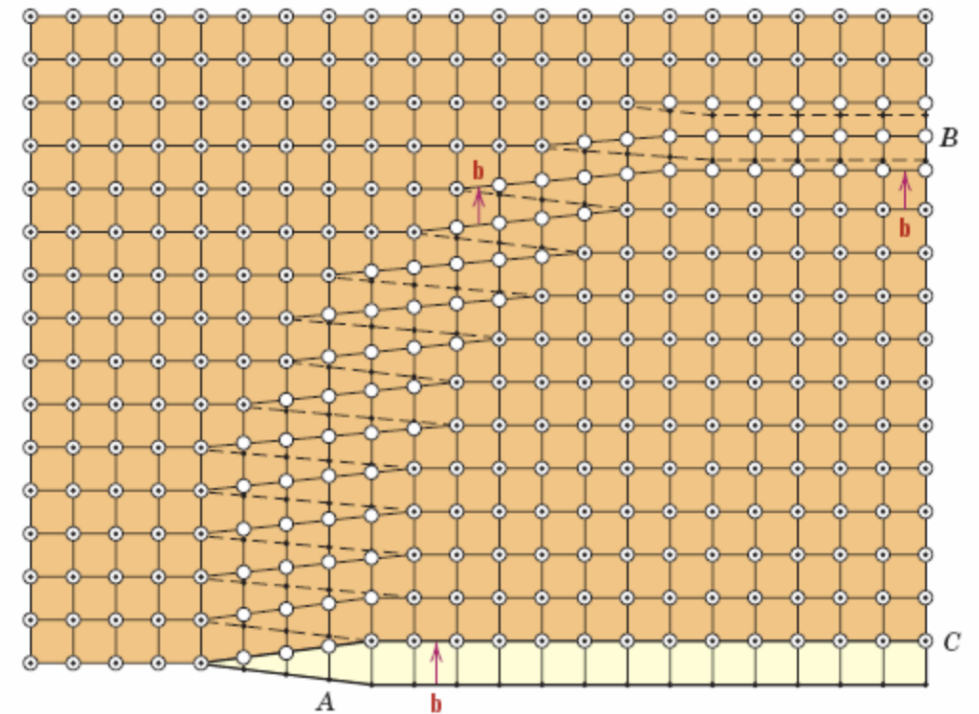
## 1. Defeitos pontuais

1. Vacâncias, interstícios, anti-sítions, substitucional, Frenkel...
2. Calcular a concentração de defeitos.
3. Raio de impurezas nas células cristalinas.

## 2. Difusão e leis de Frik

## 3. Defeitos lineares

1. Discordância em aresta e hélice.



# Última aula...

## 1. Defeitos pontuais

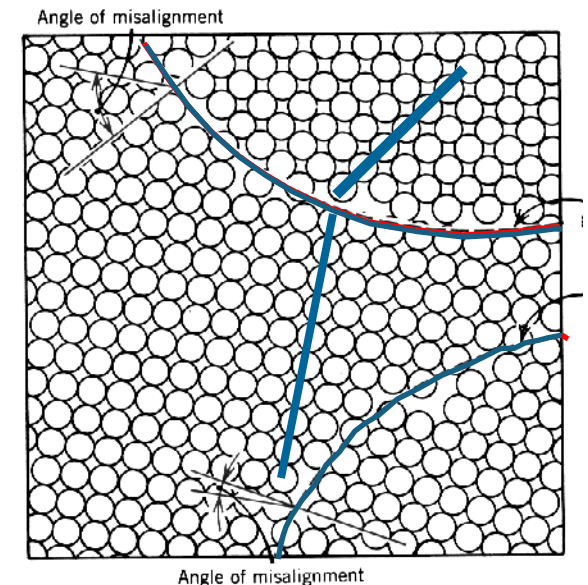
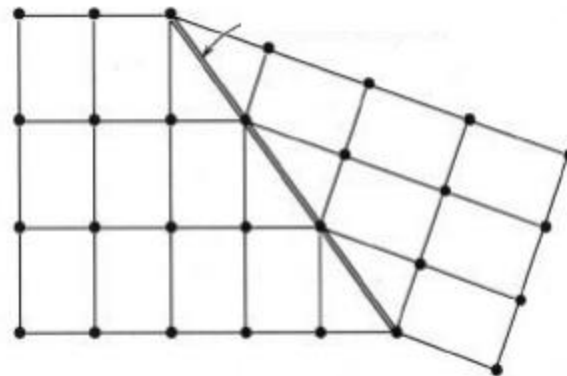
1. Vacâncias, interstícios, anti-sítions, substitucional, Frenkel...
2. Calcular a concentração de defeitos.
3. Raio de impurezas nas células cristalinas.

## 2. Difusão e leis de Frik

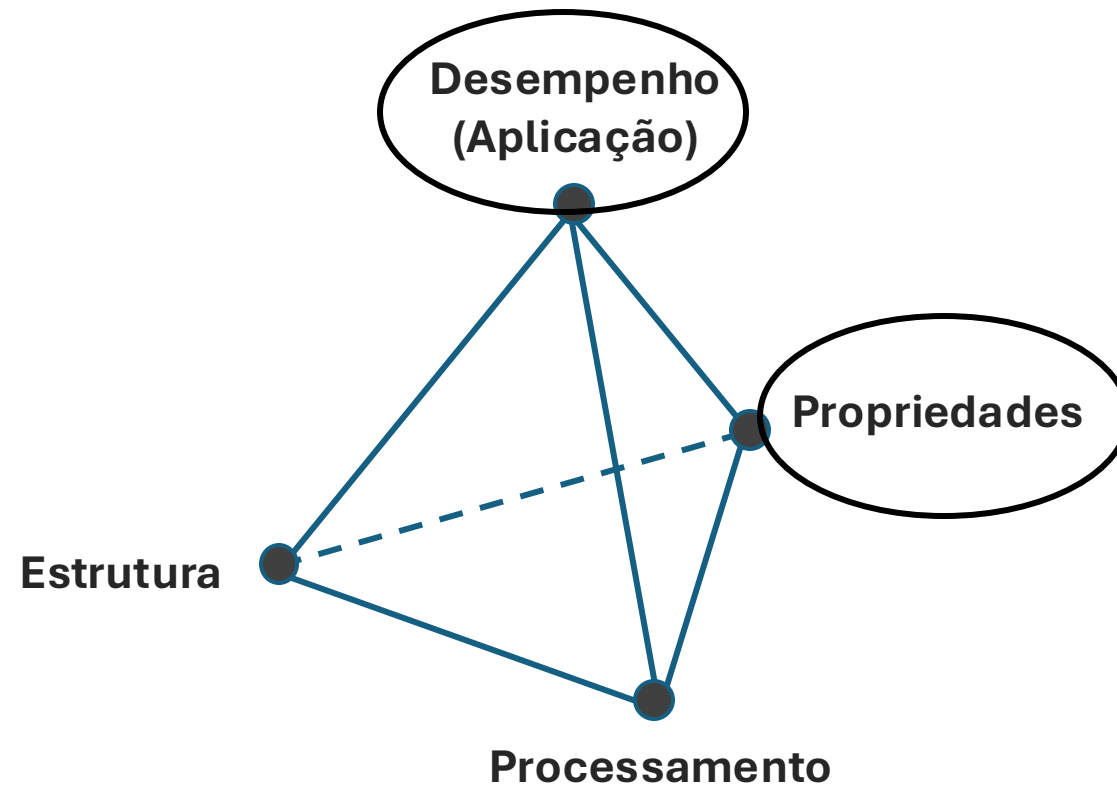
## 3. Defeitos lineares

1. Discordância em aresta e hélice.

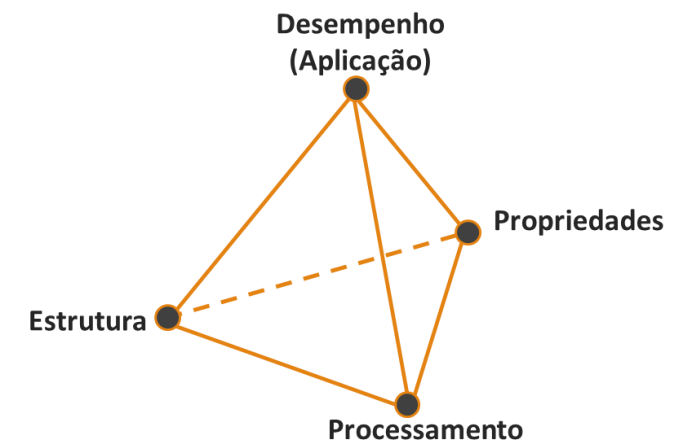
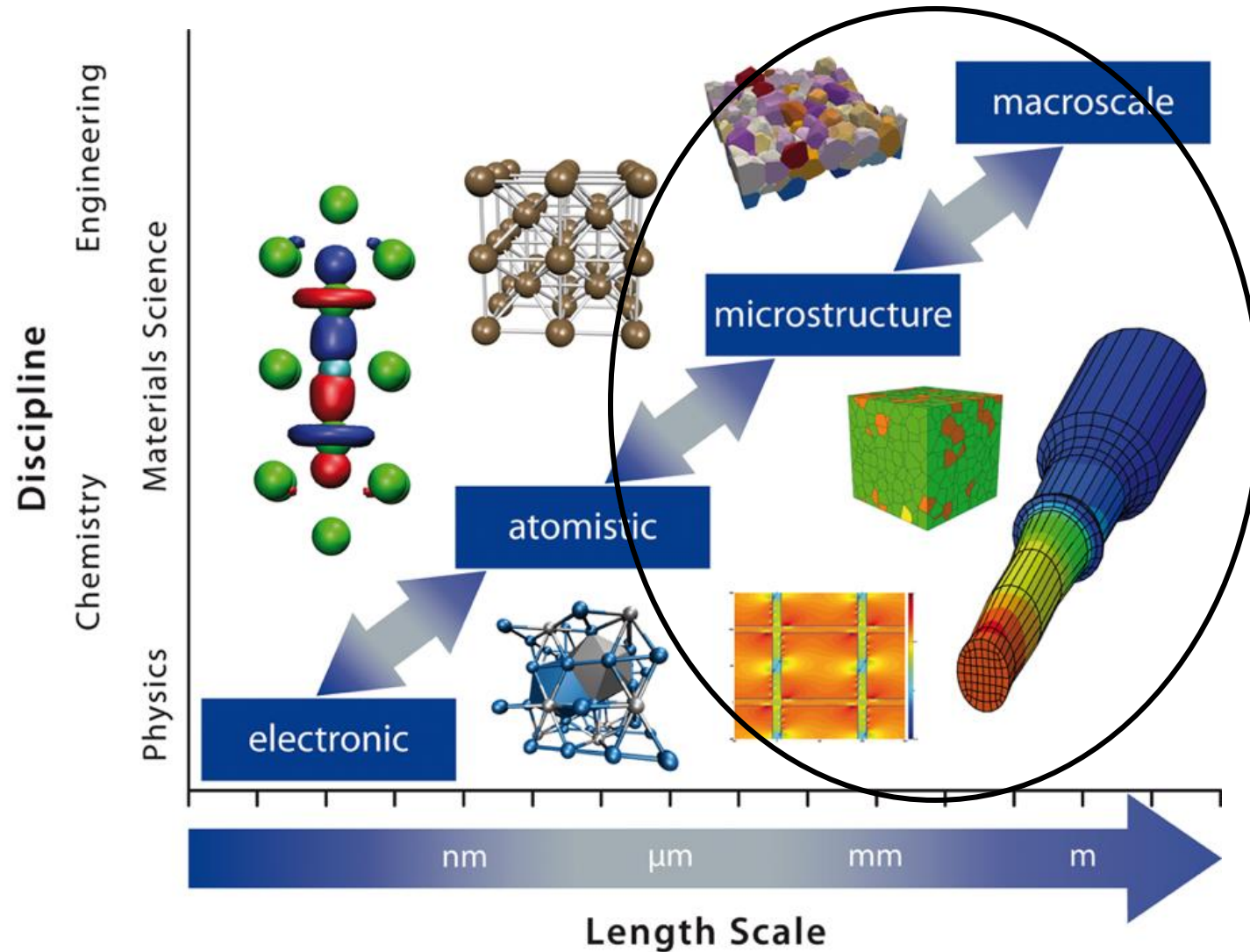
## 4. Contorno de grão



# Ciência dos materiais



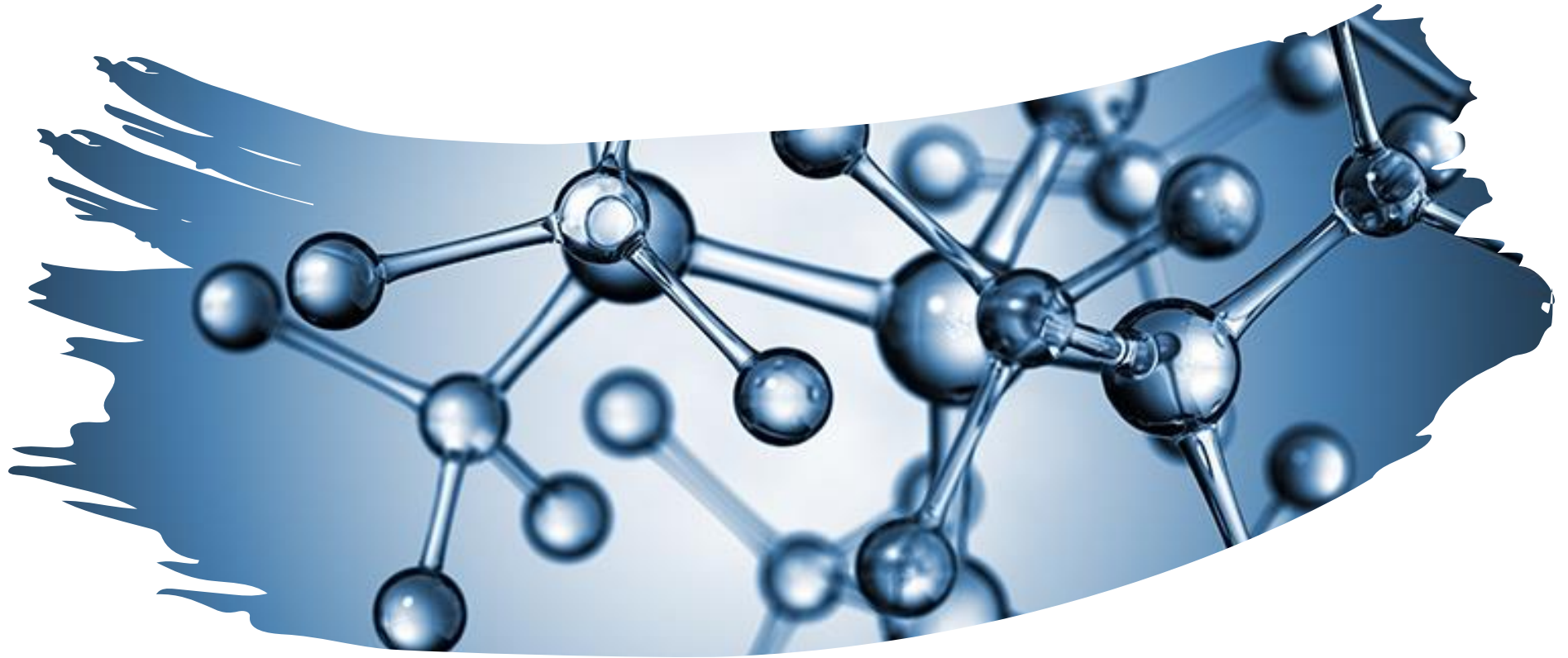
# Escalas em um Material



# Aula de hoje

- 1. Tensão e deformação**
- 2. Comportamento tensão-deformação**
- 3. Dureza**
- 4. Resistência ao impacto**
- 5. Falha**





# **1. Tensão e deformação**

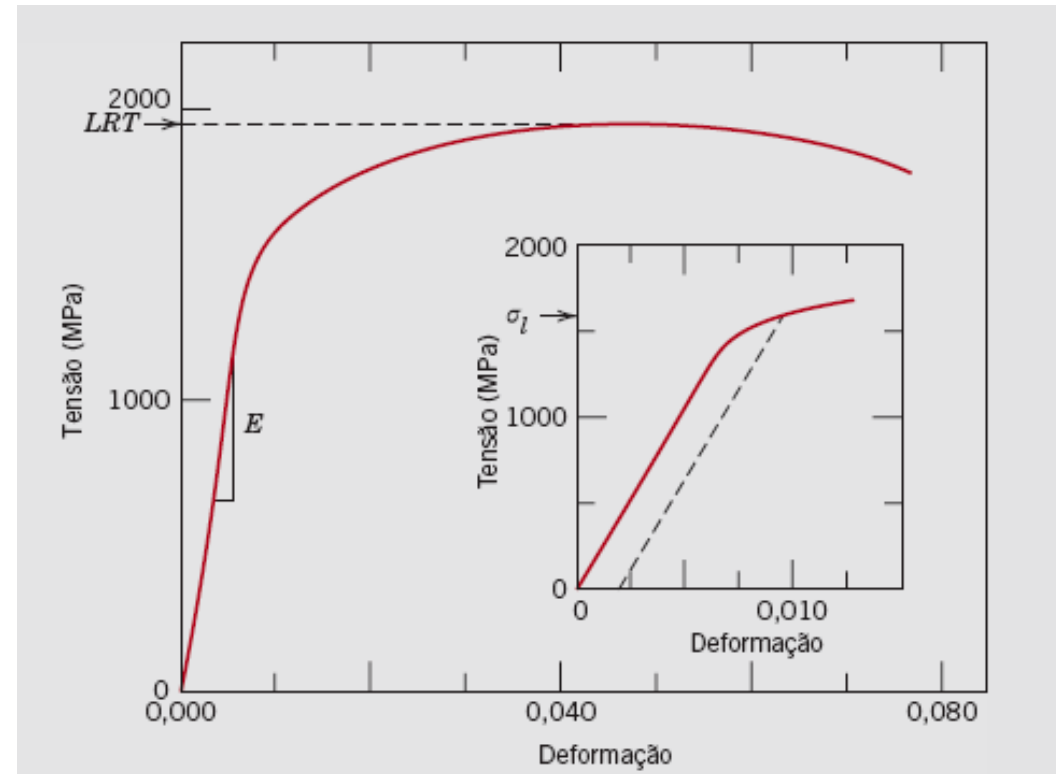
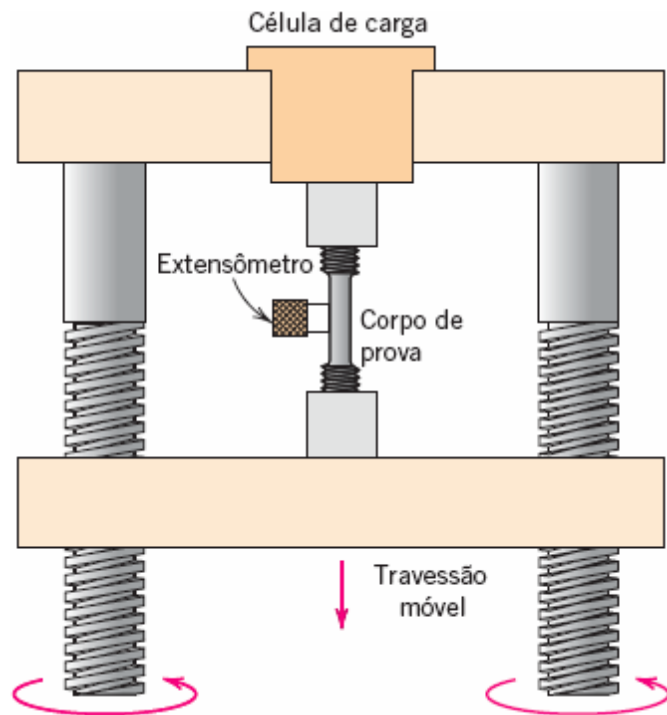
# Introdução

- Materiais submetidos a forças ou cargas (tensão, cisalhamento, compressão).
- Propriedades mecânicas verificadas em laboratório.
- Normas: ASTM (American Society for Testing Materials).



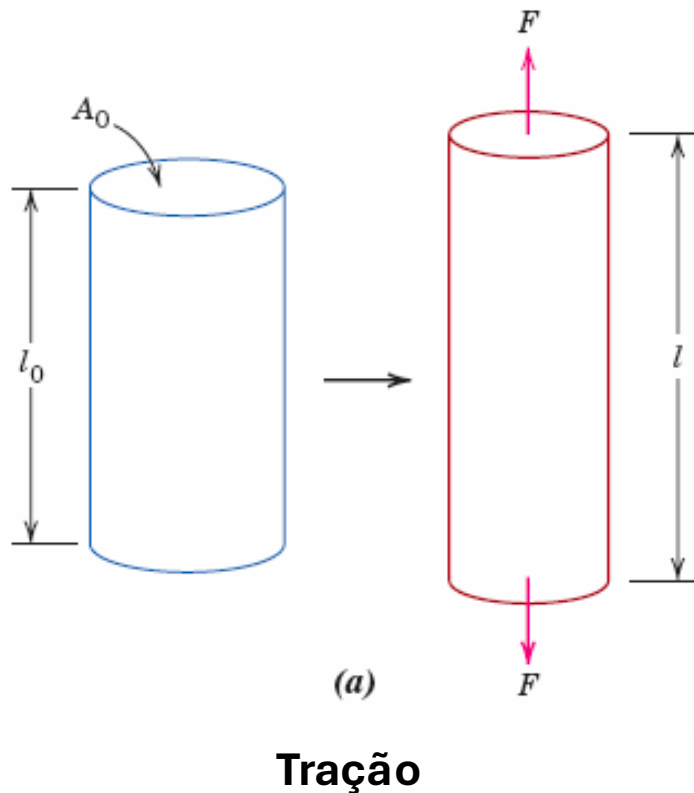
# Conceitos de Tensão e Deformação

- Carga é estática ou se varia de uma maneira relativamente lenta ao longo do tempo.
- Ensaio Tensão-deformação.



# Ensaio de tração

- Um dos ensaios mecânicos de tensão-deformação mais comuns é conduzido sob tração.
- Carga-deformação são dependentes do tamanho do corpo de prova.  
(normalização)



- **Tensão de Engenharia:**

$$\sigma = \frac{F}{A_0} [MPa]$$

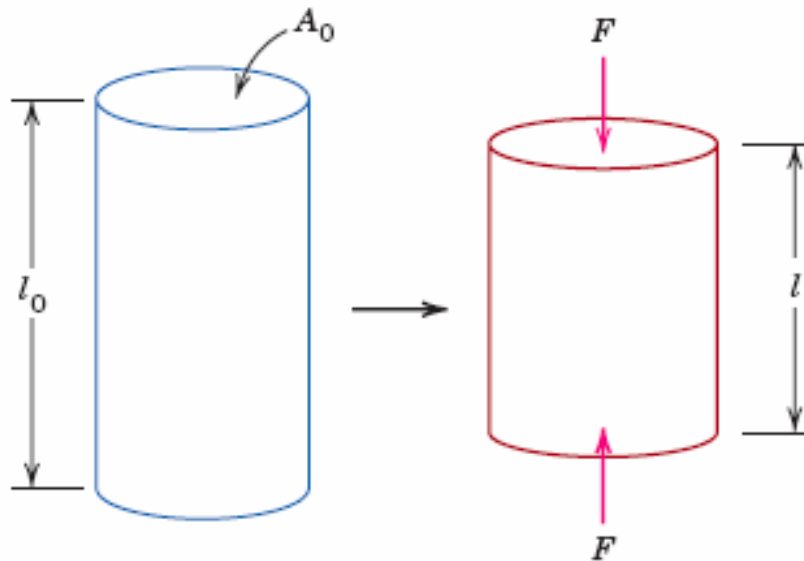
- **Deformação de Engenharia:**

$$\varepsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0}$$

Adimensional

# Ensaio de compressão

- Carga-deformação são dependentes do tamanho do corpo de prova.  
(normalização)
- Por convenção, forças compressivas são negativas.



Compressão

- **Tensão de Engenharia:**

$$\sigma = \frac{F}{A_0} [MPa]$$

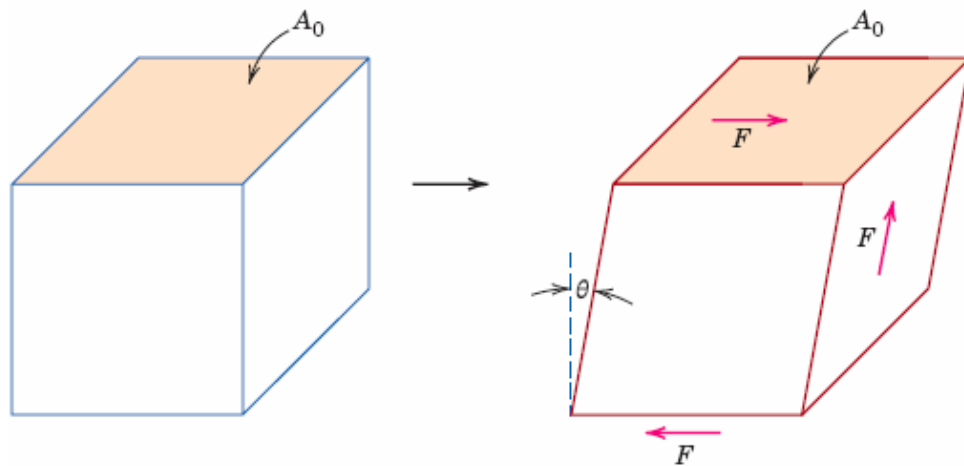
- **Deformação de Engenharia:**

$$\varepsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0}$$

Adimensional

# Ensaio de cisalhamento e de torção

- A carga ou força são impostas paralelamente às faces superior e inferior
- Carga-deformação são dependentes do tamanho do corpo de prova.  
(normalização)



Cisalhamento

## Tensão e deformação de cisalhamento

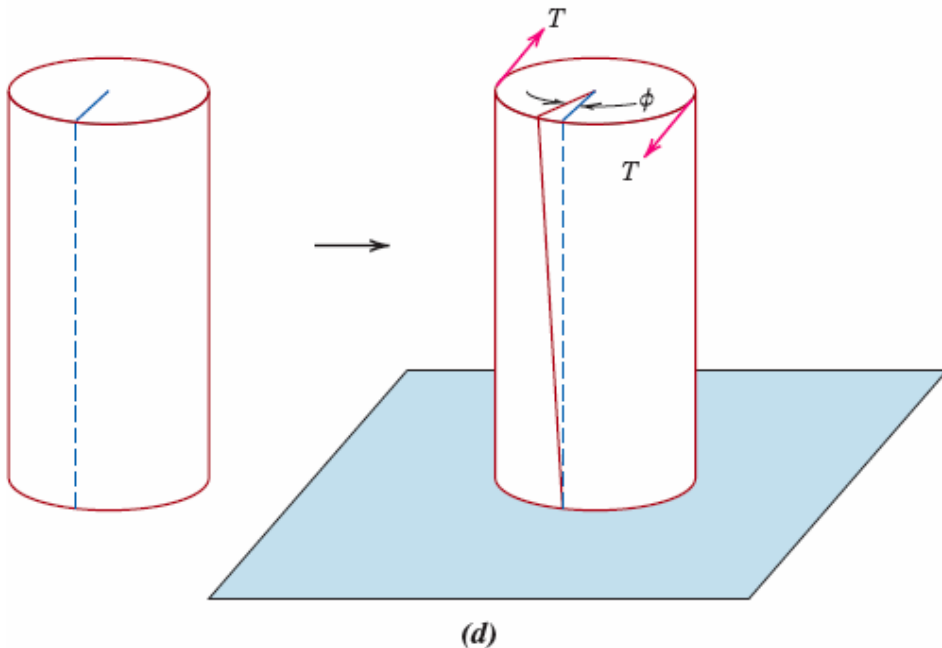
$$\tau = \frac{F}{A_0}$$

## Deformação de cisalhamento

$$\gamma = \tan \theta$$

# Ensaio de cisalhamento e de torção

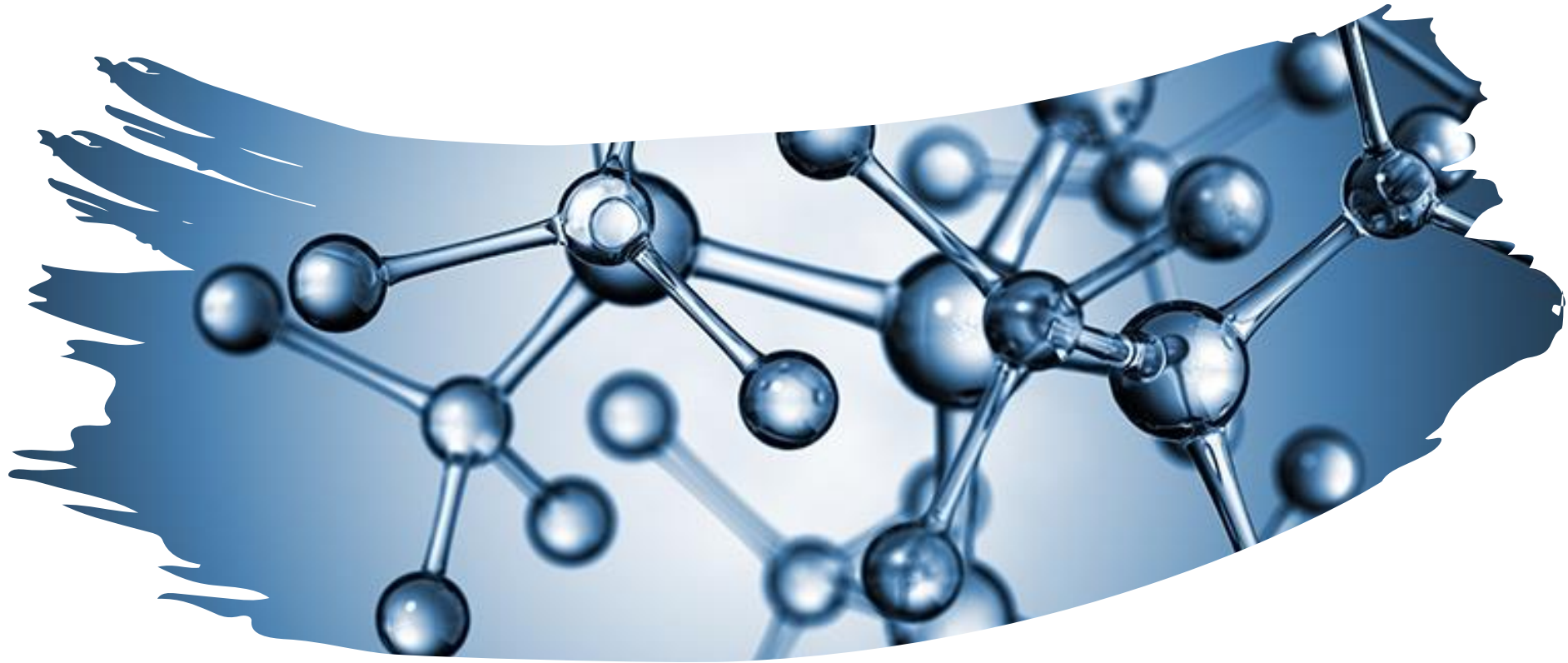
- Torção é uma variação de cisalhamento.
- As forças de torção produzem movimento de rotação.
- Carga-deformação são dependentes do tamanho do corpo de prova.  
(normalização)



Torção

**Tensão e deformação de torção depende do torque.**

**Deformação de torção depende do ângulo.**



## **2. Comportamento tensão-deformação**



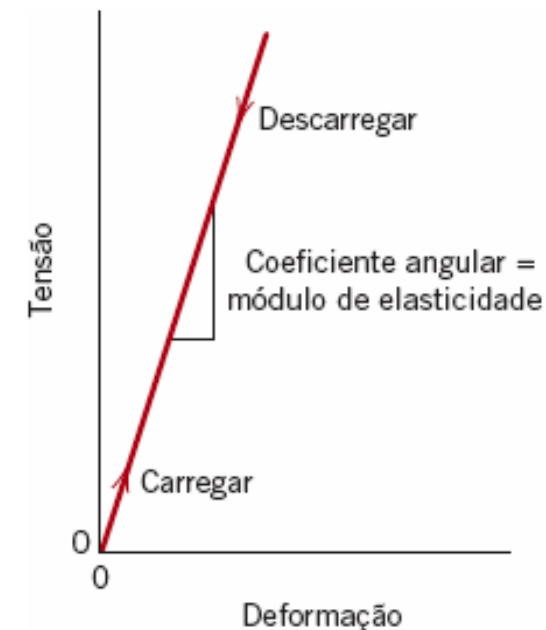
# Deformação elástica

- O grau de deforma depende da magnitude da tensão imposta.
- Metais sob baixa tensão: tensão e deformação são proporcionais (lei de Hooke).
- Constante de proporcionalidade: módulo de elasticidade, ou modulo de Young.

<i>Liga Metálica</i>	<i>Módulo de Elasticidade</i>		<i>Módulo de Cisalhamento</i>		<i>Coefficiente de Poisson</i>
	<i>GPa</i>	<i>10<sup>6</sup> psi</i>	<i>GPa</i>	<i>10<sup>6</sup> psi</i>	
Alumínio	69	10	25	3,6	0,33
Latão	97	14	37	5,4	0,34
Cobre	110	16	46	6,7	0,34
Magnésio	45	6,5	17	2,5	0,29
Níquel	207	30	76	11,0	0,31
Aço	207	30	83	12,0	0,30
Titânio	107	15,5	45	6,5	0,34
Tungstênio	407	59	160	23,2	0,28

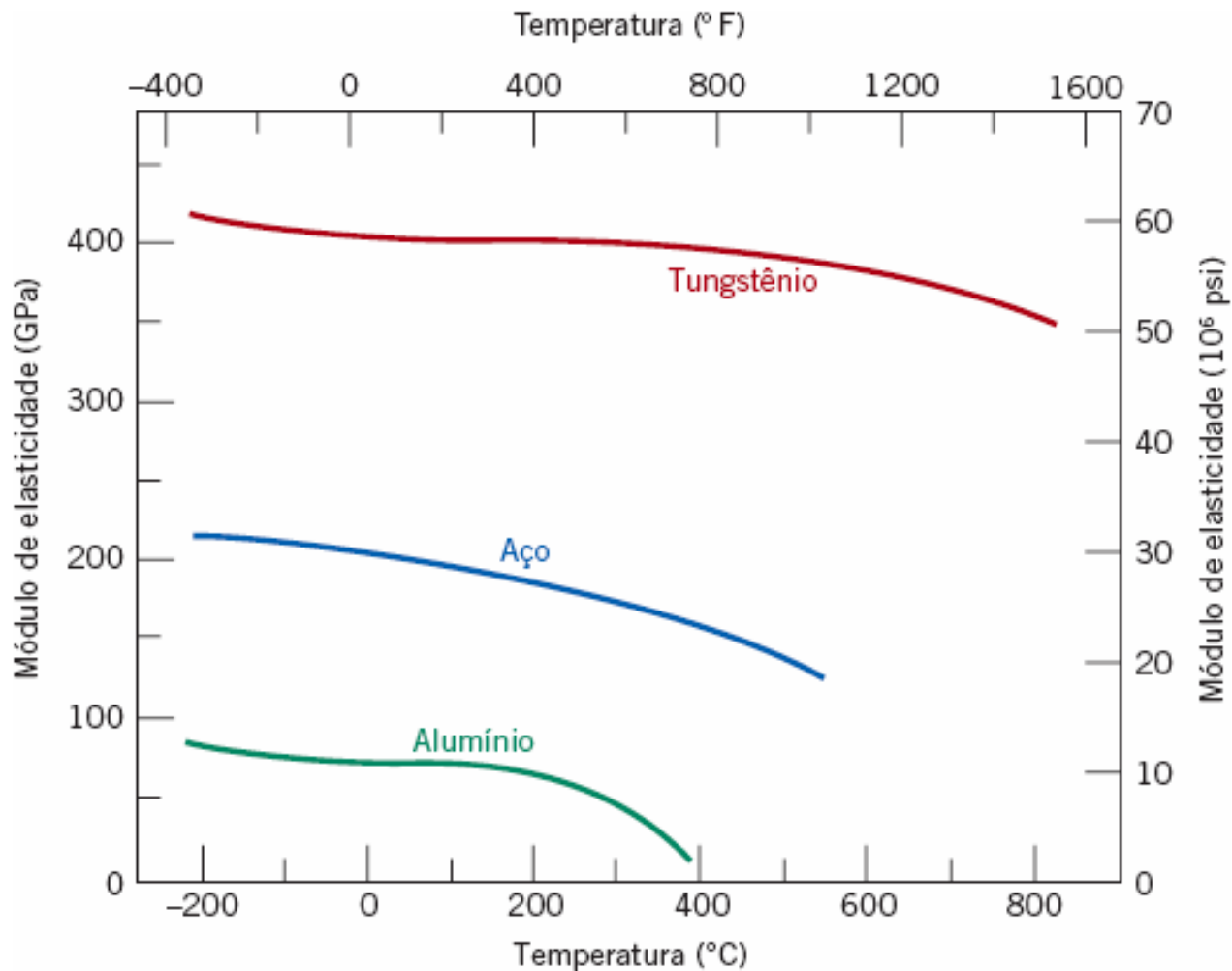
$$\sigma = E \varepsilon$$

## Deformação elástica



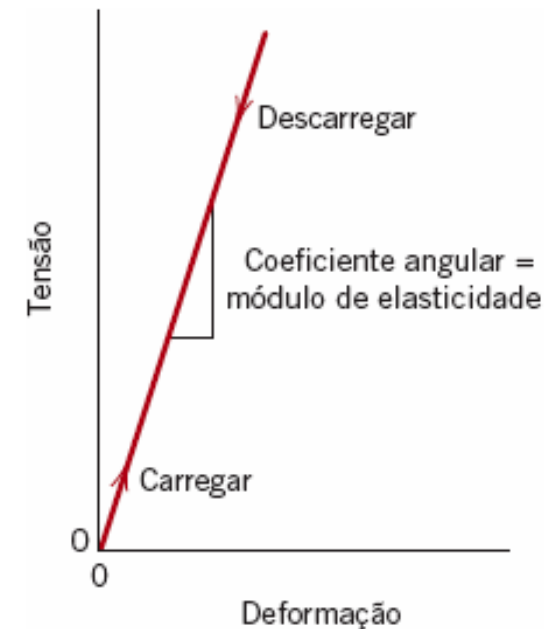
# Deformação elástica

- Dependência com a temperatura.



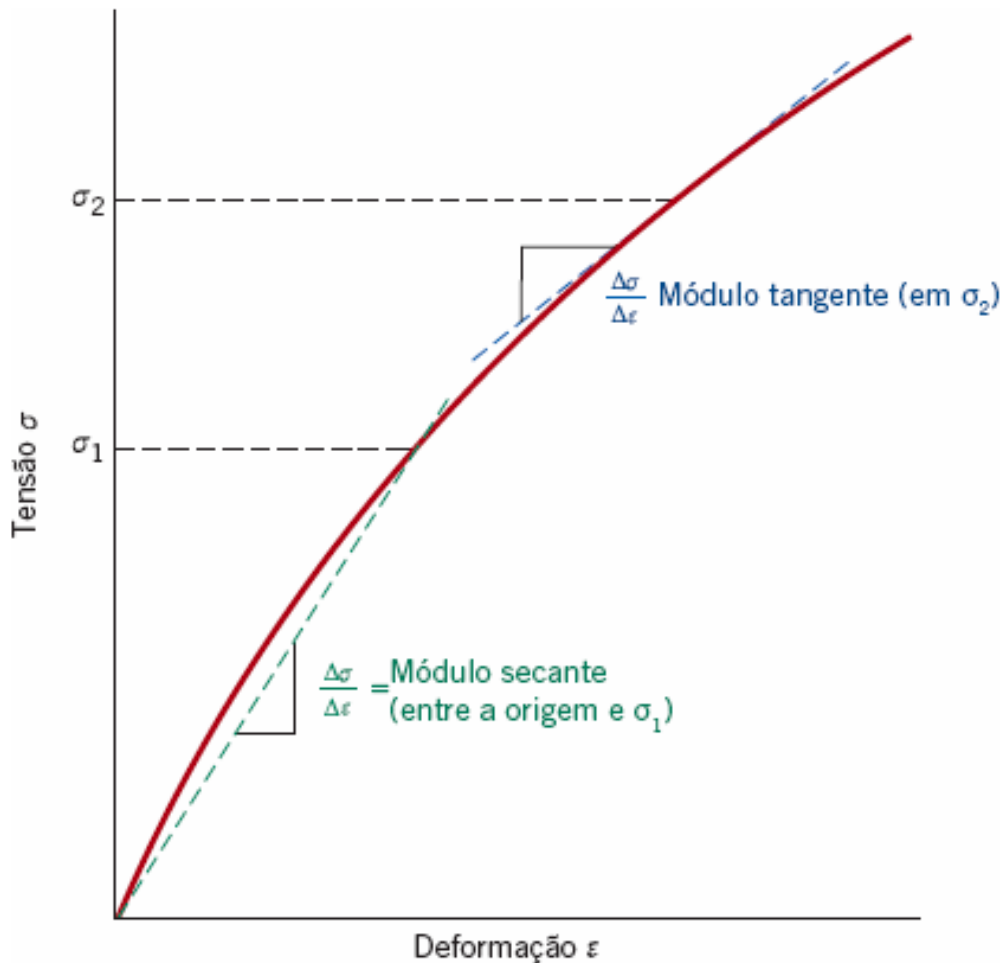
$$\sigma = E(T)\epsilon$$

## Deformação elástica

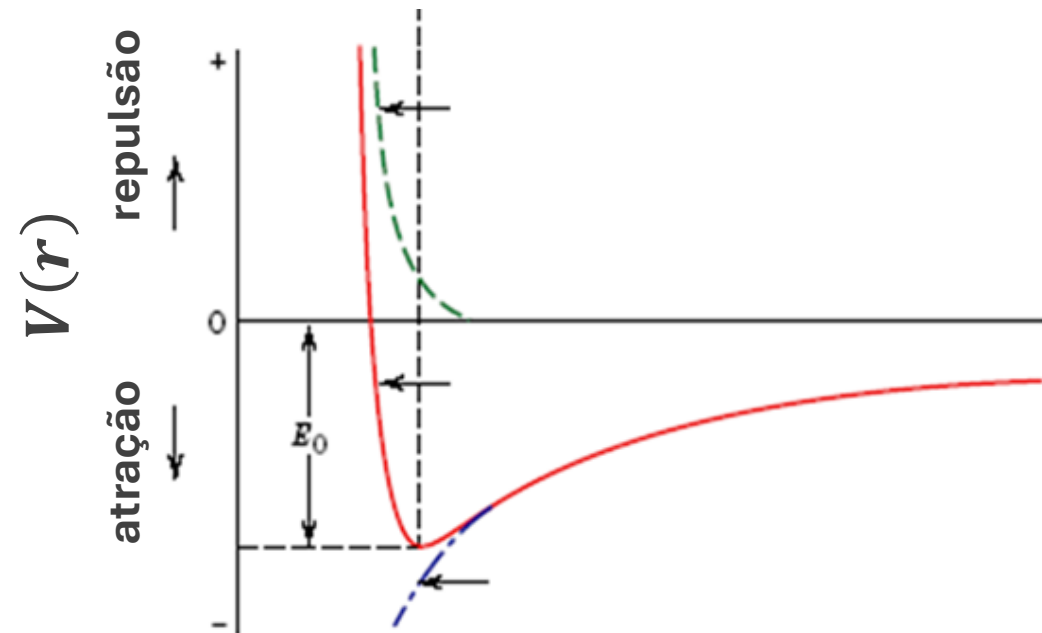


# Deformação elástica

- Existe alguns materiais onde a porção elástica não é linear.
- Exemplos: Ferro fundido, concreto e muitos polímeros.



## Regime não harmônico



# Deformação elástica

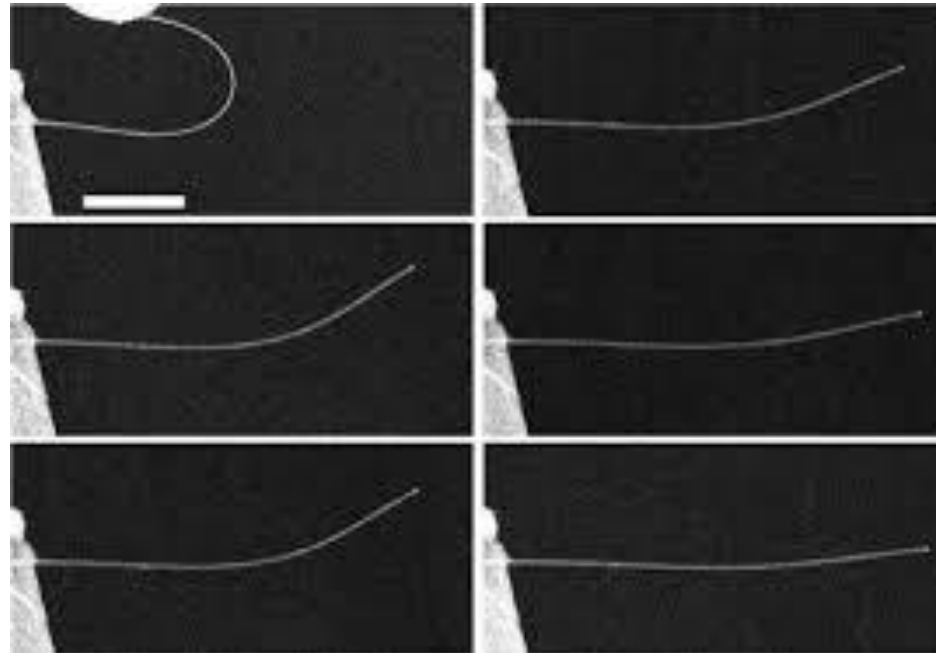
- Cisalhamento e torção também induz comportamento elástico.
- Metais sob baixa tensão: cisalhamento (torção) e deformação são proporcionais (lei de Hooke).
- Constante de proporcionalidade: módulo de cisalhamento, ou modulo de Young.

<i>Liga Metálica</i>	<i>Módulo de Elasticidade</i>		<i>Módulo de Cisalhamento</i>		<i>Coefficiente de Poisson</i>
	<i>GPa</i>	<i>10<sup>6</sup> psi</i>	<i>GPa</i>	<i>10<sup>6</sup> psi</i>	
Alumínio	69	10	25	3,6	0,33
Latão	97	14	37	5,4	0,34
Cobre	110	16	46	6,7	0,34
Magnésio	45	6,5	17	2,5	0,29
Níquel	207	30	76	11,0	0,31
Aço	207	30	83	12,0	0,30
Titânio	107	15,5	45	6,5	0,34
Tungstênio	407	59	160	23,2	0,28

$$\tau = G\gamma$$

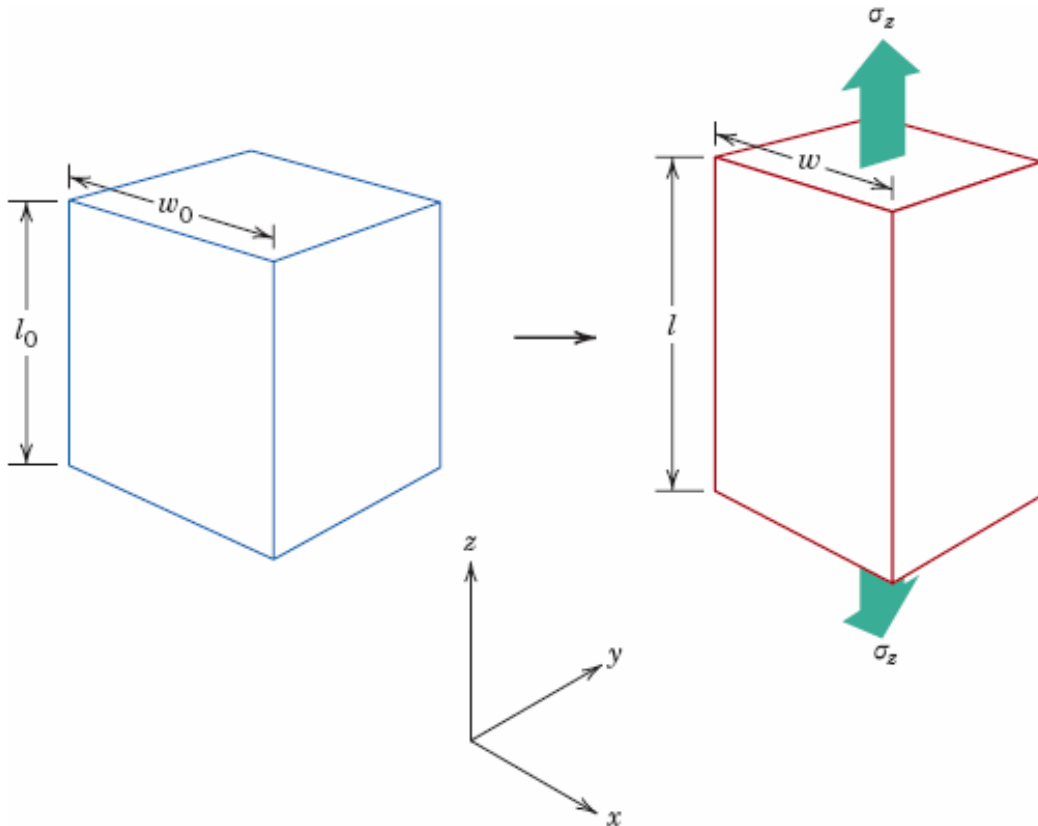
# Anelasticidade

- Deformação elástica dependente do tempo.
- Necessita de tempo para recuperação completa após liberação de carga.
- Comportamento elástico dependente do tempo: anelasticidade
- Comum em polímeros (comportamento viscoelástico).



# Propriedades elásticas dos materiais

- Alongamento em um sentido provoca contração em outros sentidos.
- Tensão uniaxial e material isotrópico:



- **Deformação:**

$$\epsilon_z = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} > 0$$

$$\epsilon_x = \frac{w - w_0}{w_0} = \frac{\Delta w}{w_0} < 0$$

- **Coeficiente de Poisson:**

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

- **Módulo de cisalhamento e elasticidade**

$$E = 2G(1 + \nu)$$

# Propriedades elásticas dos materiais

- Alongamento em um sentido provoca contração em outros sentidos.
- Tensão uniaxial e material isotrópico:

Liga Metálica	Módulo de Elasticidade		Módulo de Cisalhamento		Coeficiente de Poisson
	GPa	10 <sup>6</sup> psi	GPa	10 <sup>6</sup> psi	
Alumínio	69	10	25	3,6	0,33
Latão	97	14	37	5,4	0,34
Cobre	110	16	46	6,7	0,34
Magnésio	45	6,5	17	2,5	0,29
Níquel	207	30	76	11,0	0,31
Aço	207	30	83	12,0	0,30
Titânio	107	15,5	45	6,5	0,34
Tungstênio	407	59	160	23,2	0,28

- **Deformação:**

$$\epsilon_z = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} > 0$$

$$\epsilon_x = \frac{w - w_0}{w_0} = \frac{\Delta w}{w_0} < 0$$

- **Coeficiente de Poisson:**

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

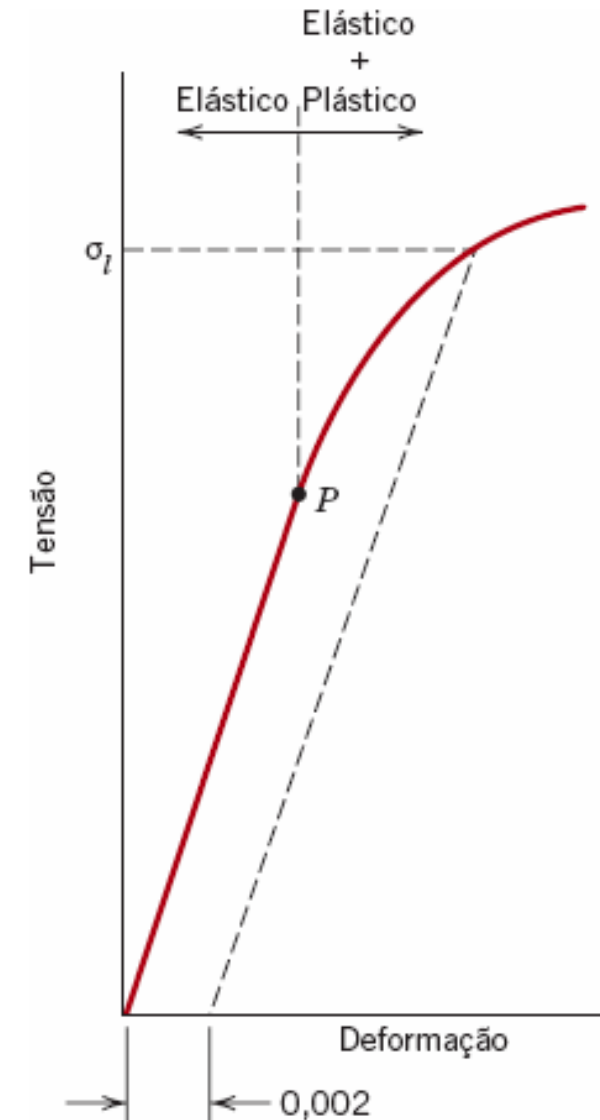
- **Módulo de cisalhamento e elasticidade**

$$E = 2G(1 + \nu)$$

# Deformação plástica

- Propriedade elástica (metais): deformação  $\sim 0.005$
- Deformação permanente: plástica
  - Quebra de ligações químicas (escorregamento)

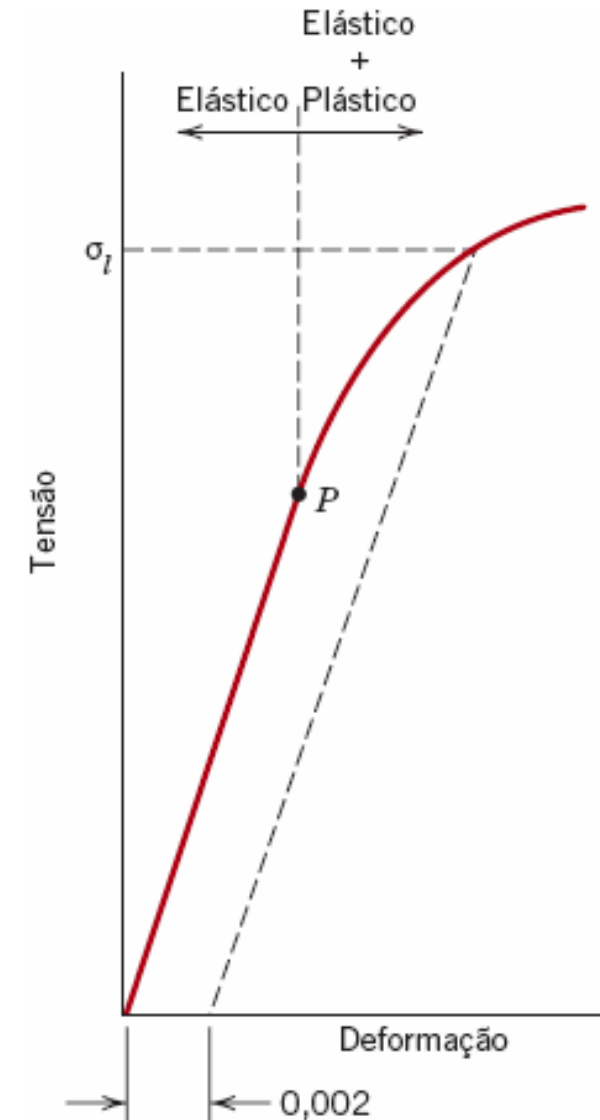
$$\varepsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0}$$





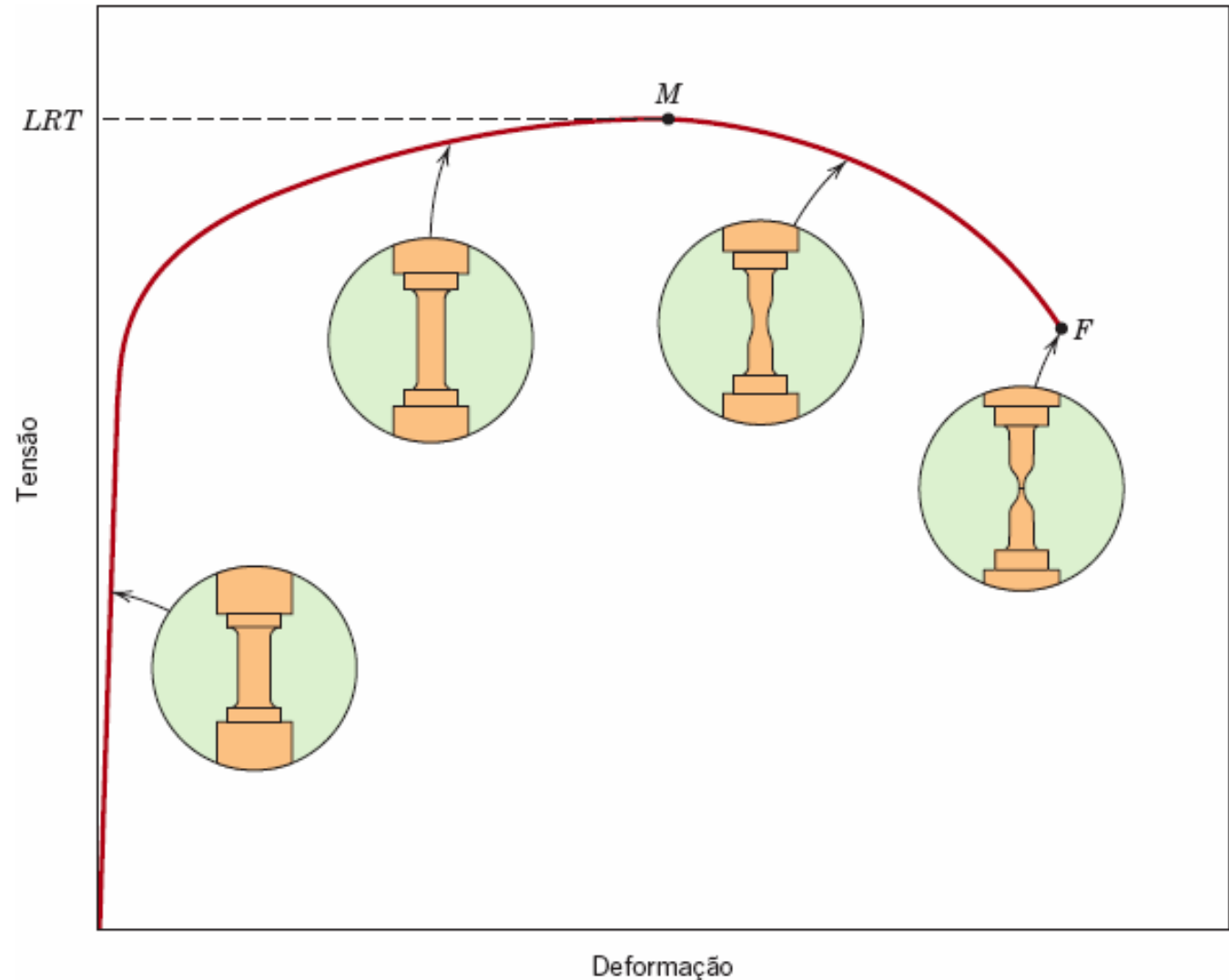
# Escoamento

- Desejável sistemas no limite elástico.
- Tensão que tem início de deformação plástica: **escoamento**.
- Limite de proporcionalidade P.
- **Limite de escoamento** ou **resistência ao escoamento**: linha reta é construída paralelamente à porção elástica da curva tensão-deformação em alguma pré-deformação especificada, geralmente de 0,002.



# Limite de Resistência à tração

- Limite de resistência à tração: tensão máxima da curva tensão-deformação.
- Se a tensão for aplicada e mantida vai ocorrer fratura.
- Estricção: formação de um pescoço no corpo de prova.

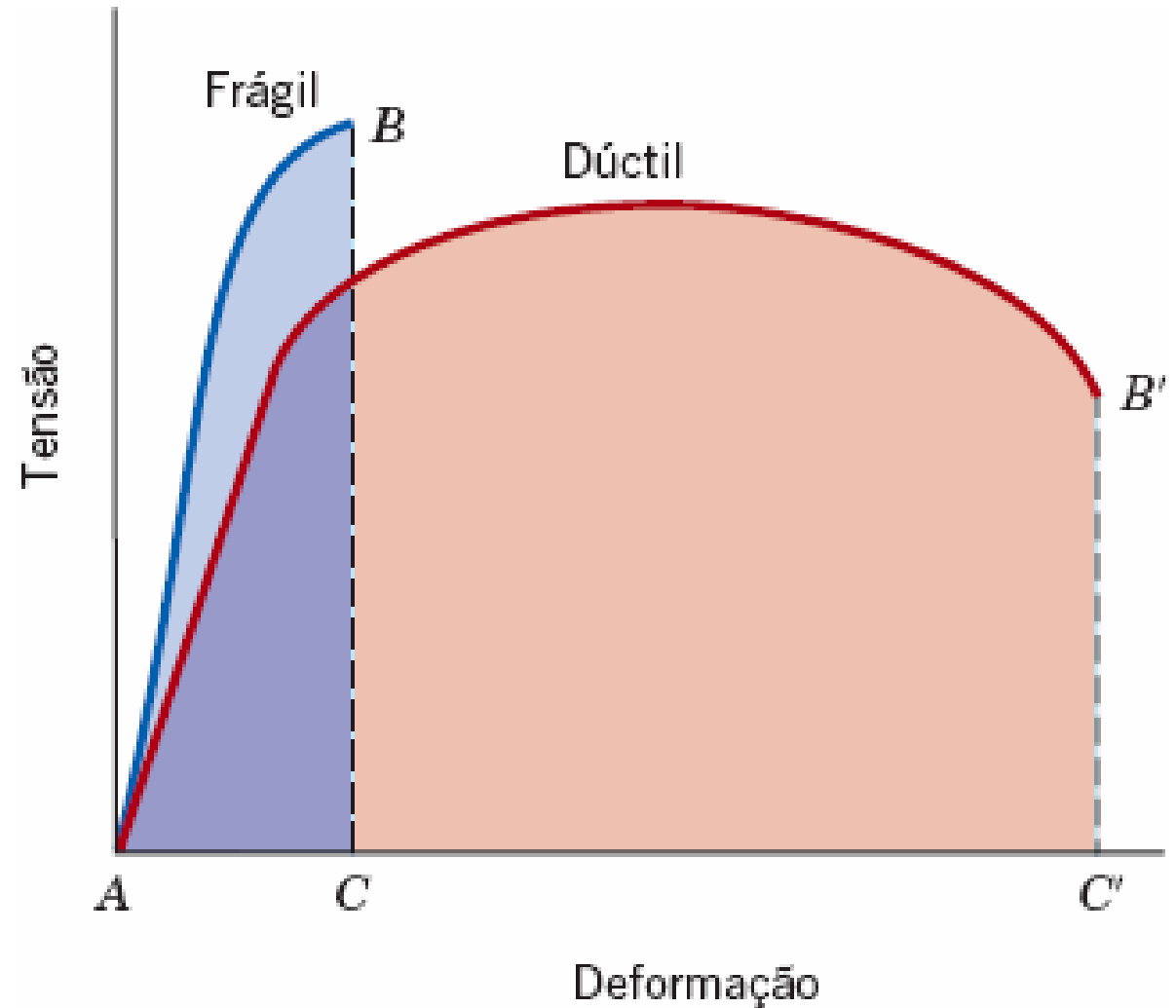


# Ductilidade

- Ductilidade: medida do grau de deformação plástica que foi suportado até a fratura.
- Deformação plástica muito pequena (ou nenhuma) até a fratura é denominado **frágil**.
- Ductilidade

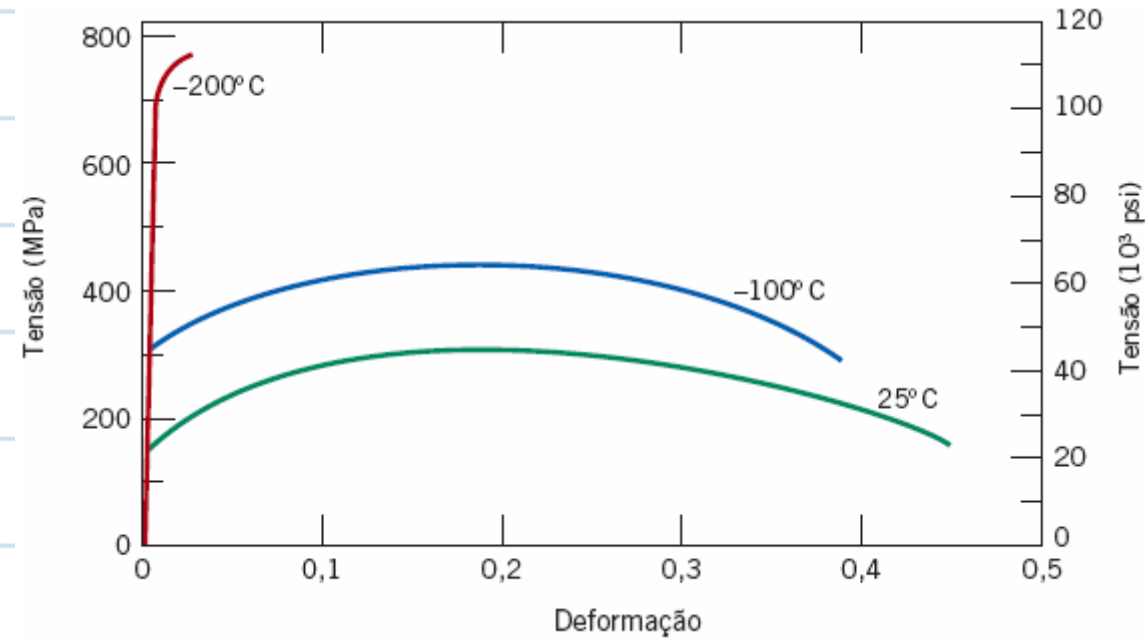
$$\%AL = \left( \frac{l_f - l_0}{l_0} \right) \times 100$$

$$\%RA = \left( \frac{A_0 - A_f}{A_0} \right) \times 100$$



# Ductilidade

<i>Liga Metálica</i>	<i>Limite de Escoamento, MPa (ksi)</i>	<i>Limite de Resistência à Tração, MPa (ksi)</i>	<i>Ductilidade, %AL [em 50 mm (2 in)]</i>
Alumínio	35 (5)	90 (13)	40
Cobre	69 (10)	200 (29)	45
Latão (70 Cu-30 Zn)	75 (11)	300 (44)	68
Ferro	130 (19)	262 (38)	45
Níquel	138 (20)	480 (70)	40
Aço (1020)	180 (26)	380 (55)	25
Titânio	450 (65)	520 (75)	25
Molibdênio	565 (82)	655 (95)	35



# Resiliência

- Resiliência: capacidade de um material de absorver energia quando ele é deformado elasticamente.
- Módulo de resiliência (energia por unidade de volume).

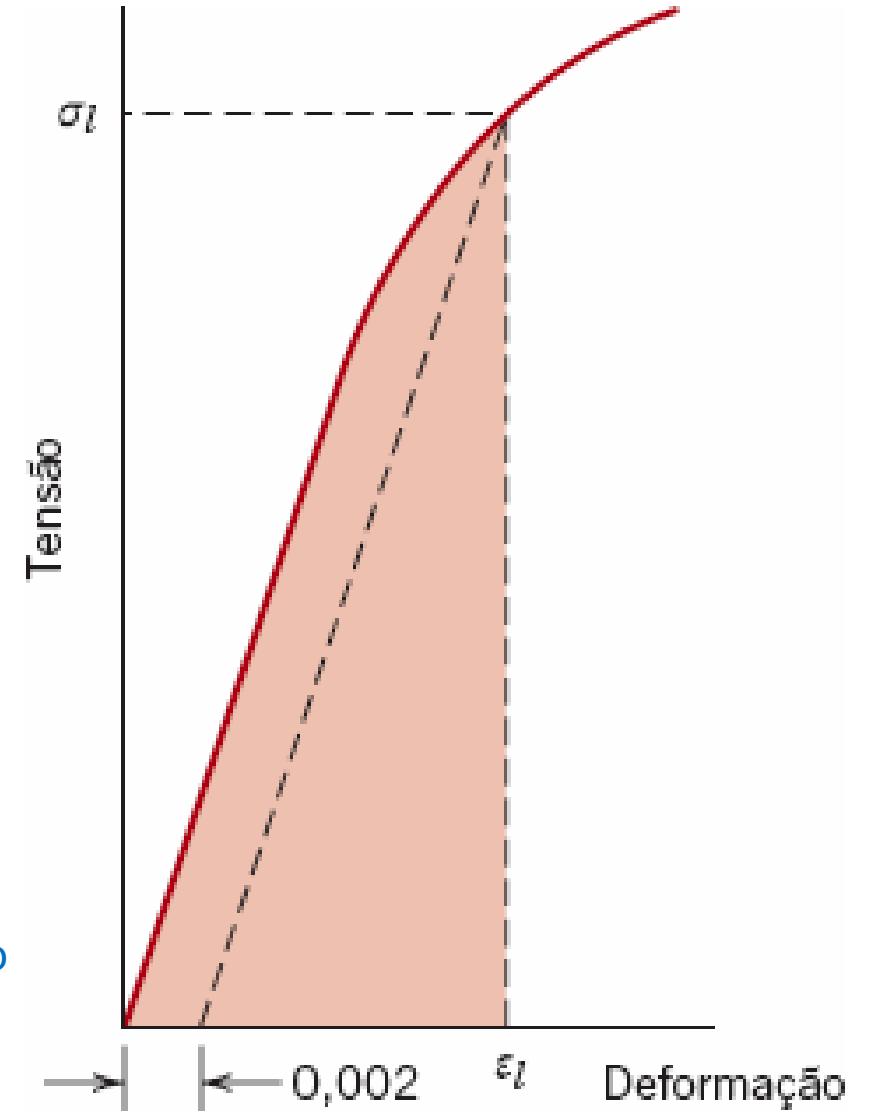
$$U_r = \int_0^{\epsilon_l} \sigma d\epsilon$$

$$U_r = \frac{1}{2} \sigma_l \epsilon_l$$

- Incluindo deformação elástica

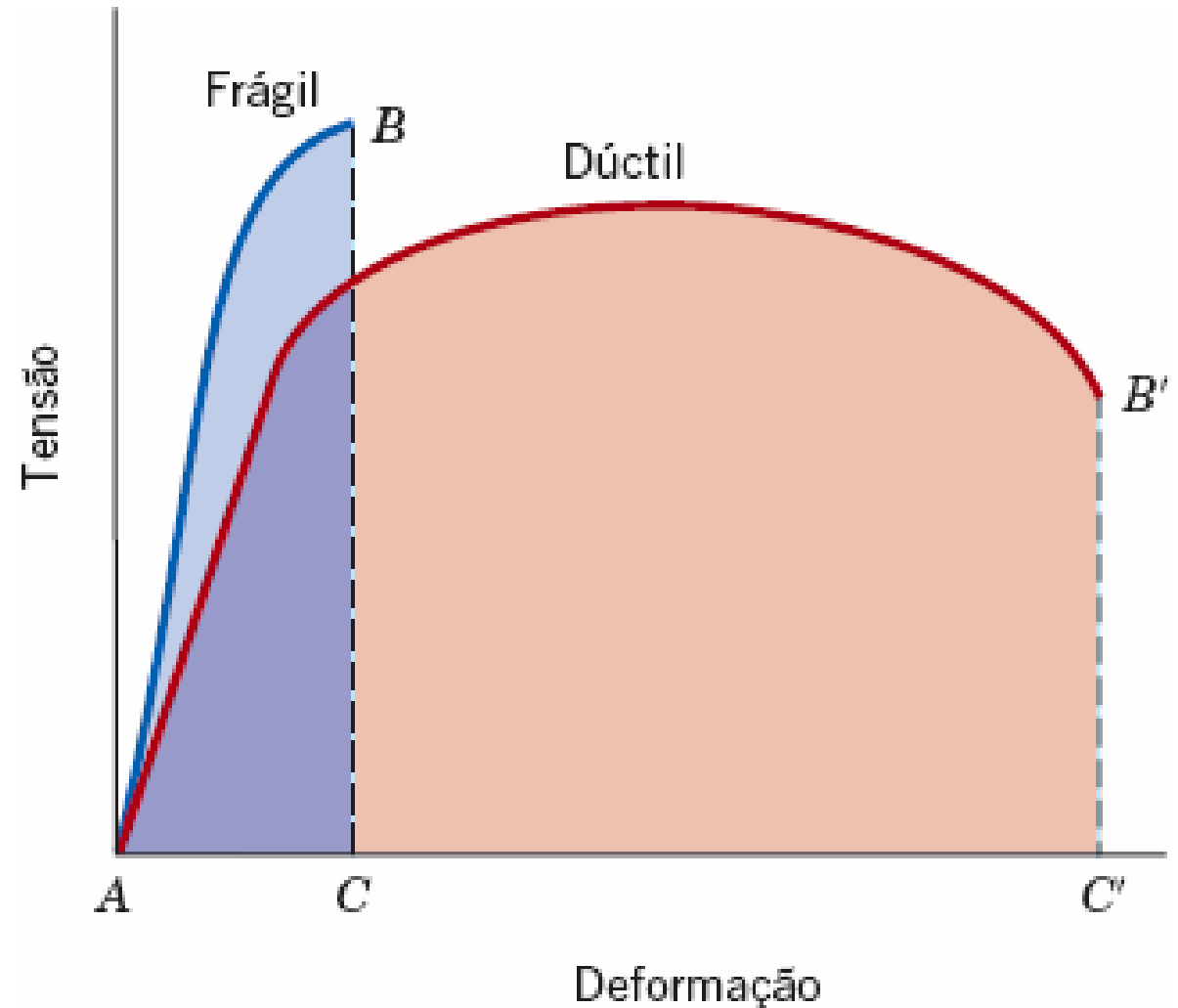
$$U_r = \frac{1}{2} \sigma_l \epsilon_l = \frac{1}{2} \sigma_l \left( \frac{\sigma_l}{E} \right) = \frac{\sigma_l^2}{2E}$$

Material resiliênte:  
limite de escoamento  
alto e módulo de  
elasticidade baixo  
(usado em molas).



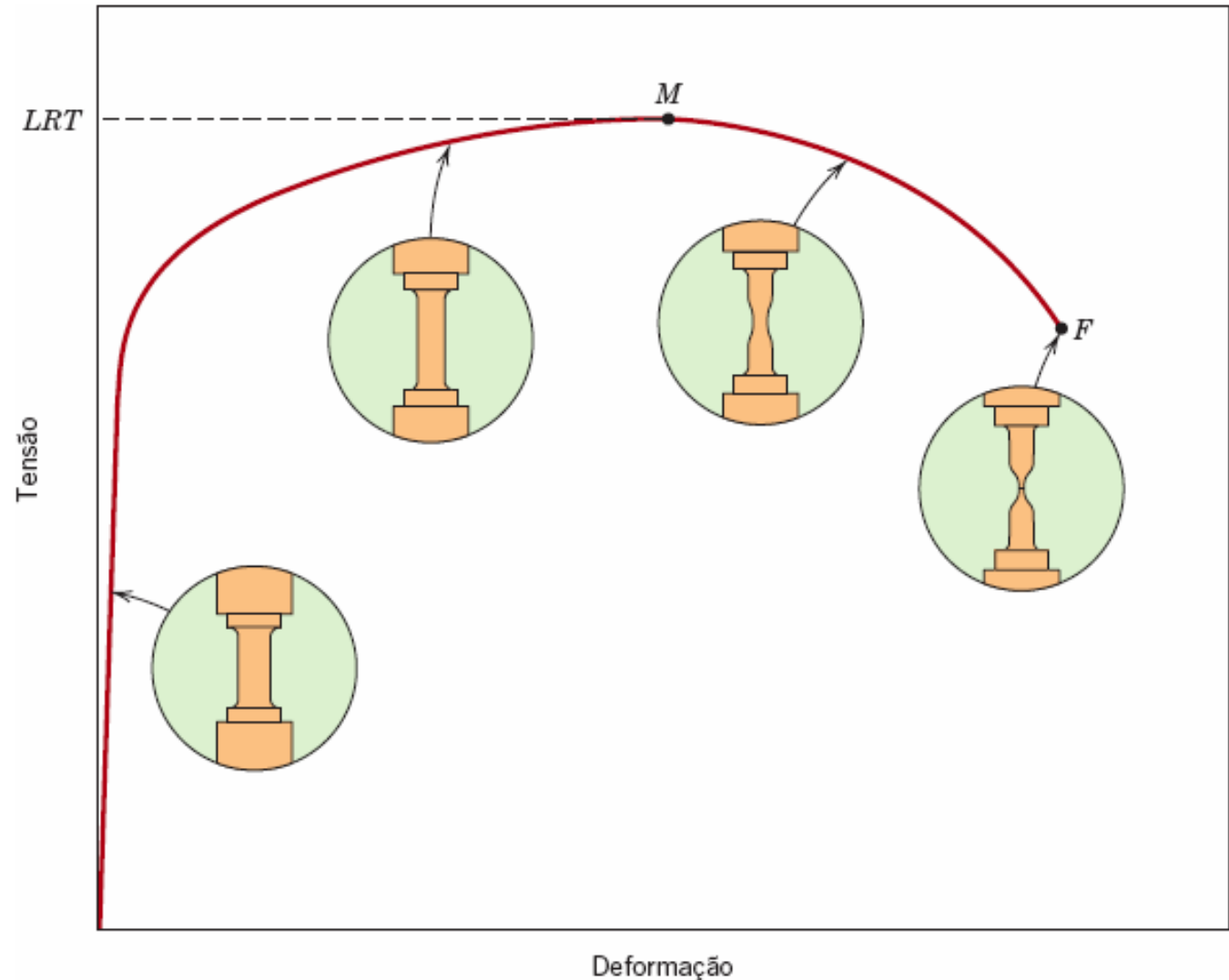
# Tenacidade

- Tenacidade: propriedade indicativa da resistência de um material à fratura quando uma trinca.
- Tenacidade: capacidade de um material absorver energia e se deformar plasticamente antes de fraturar.
- Área sob a curva  $\sigma$ - $\epsilon$  até o ponto da fratura.
- Para que um metal seja tenaz, ele precisa exibir tanto resistência quanto ductilidade.



# Tensão e deformação verdadeira

- Diminuição da tensão necessária para continuar a deformação após o ponto máximo — ponto *M*.
- Parece indicar metal menos resistente.
- Na verdade, a resistência está aumentando.
- O que está mudando?



# Tensão e deformação verdadeira

- Tensão verdadeira

$$\sigma_v = \frac{F}{A_i}$$

$A_i$  - seção transversão instantânea

- Deformação verdadeira

$$\epsilon_v = \ln \frac{l_i}{l_0}$$

$l_i$  - comprimento instantânea

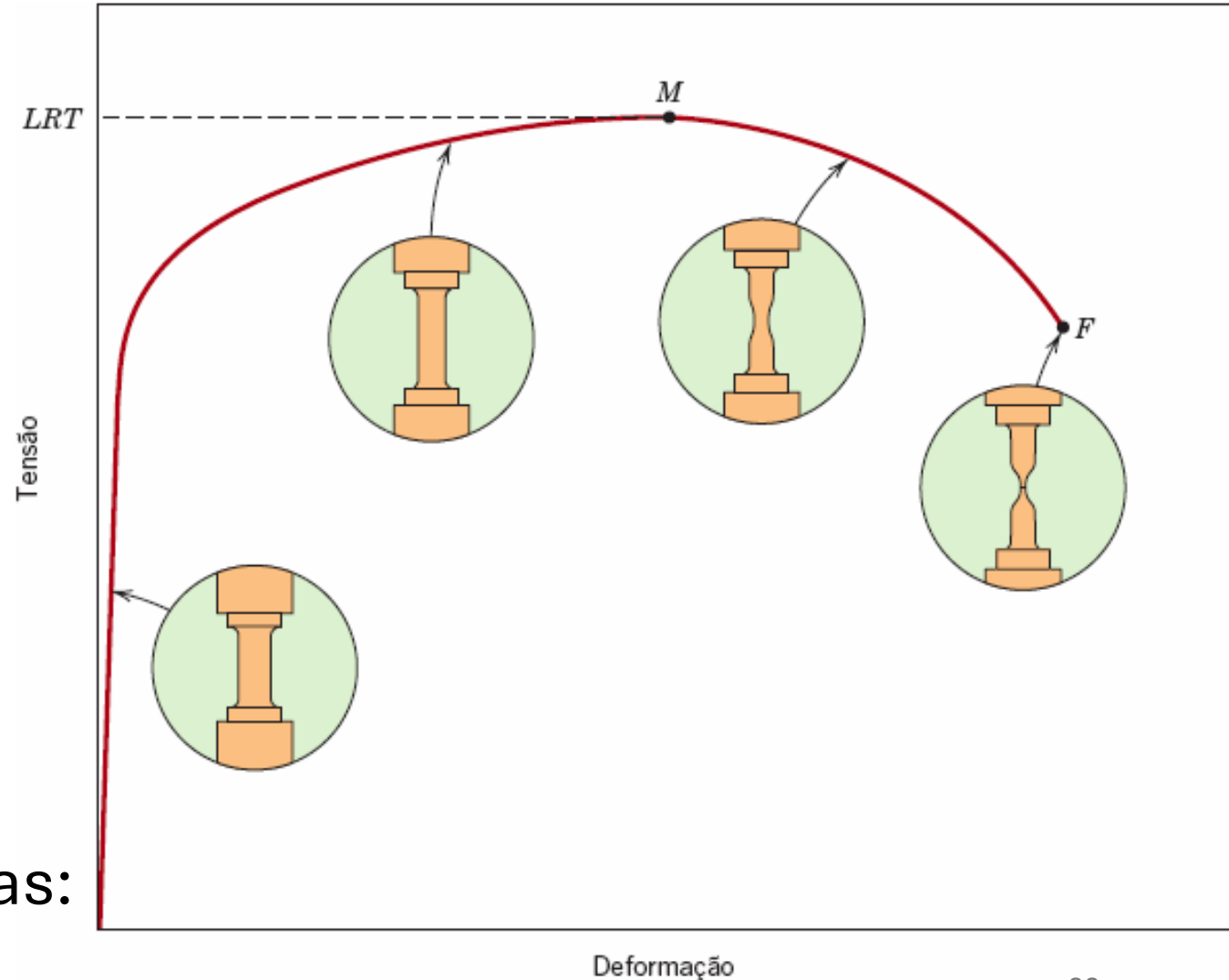
- Conservação de volume

$$A_i l_i = A_0 l_0$$

- Tensão e deformação verdadeiras:

$$\sigma_v = \sigma(1 + \epsilon)$$

$$\epsilon_v = \ln(1 + \epsilon)$$





# Tensão e deformação verdadeira

- Tensão verdadeira

$$\sigma_v = \frac{F}{A_i}$$

$A_i$  - seção transversão instantânea

- Deformação verdadeira

$$\epsilon_v = \ln \frac{l_i}{l_0}$$

$l_i$  - comprimento instantânea

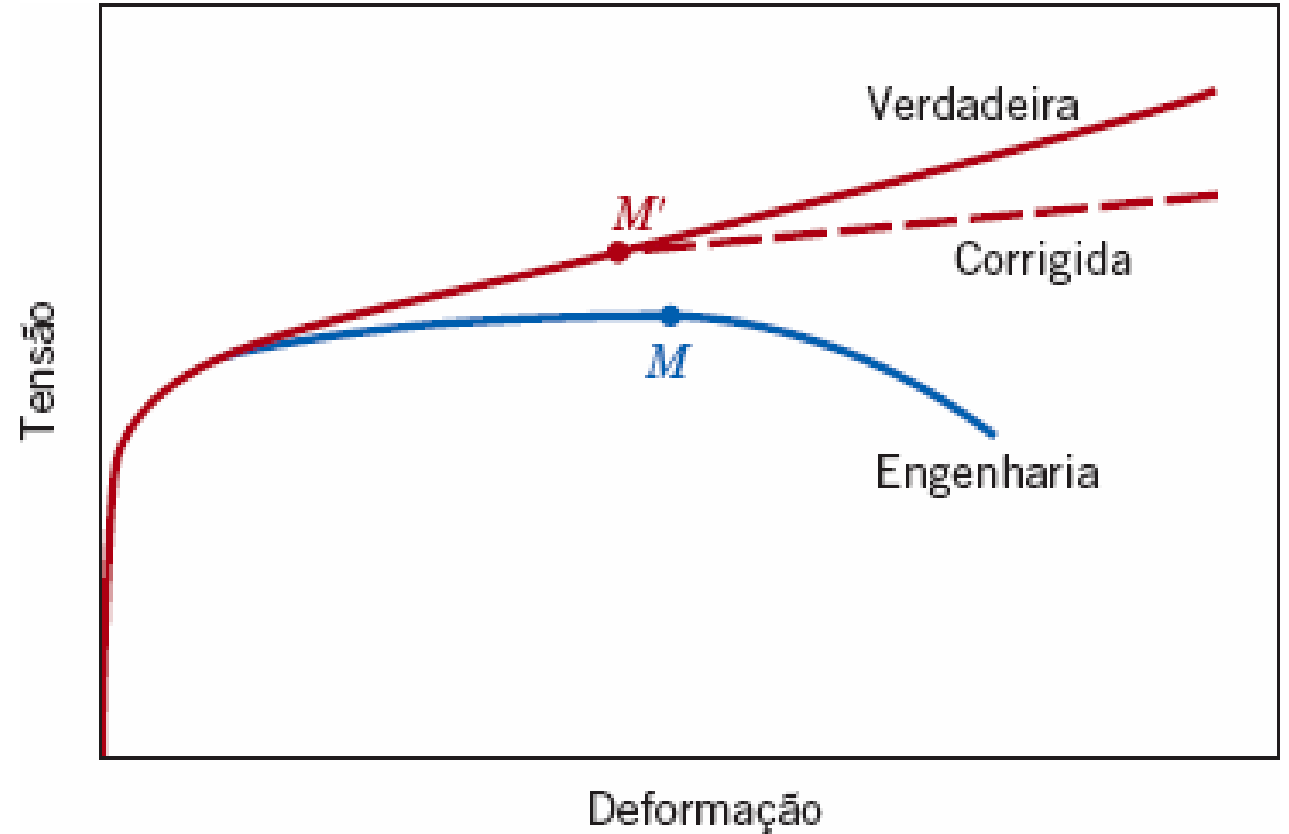
- Conservação de volume

$$A_i l_i = A_0 l_0$$

- Tensão e deformação verdadeiras:

$$\sigma_v = \sigma(1 + \epsilon)$$

$$\epsilon_v = \ln(1 + \epsilon)$$



# Tensão e deformação verdadeira

- Tensão verdadeira

$$\sigma_v = \frac{F}{A_i}$$

$A_i$  - seção transversão instantânea

- Deformação verdadeira

$$\epsilon_v = \ln \frac{l_i}{l_0}$$

$l_i$  - comprimento instantânea

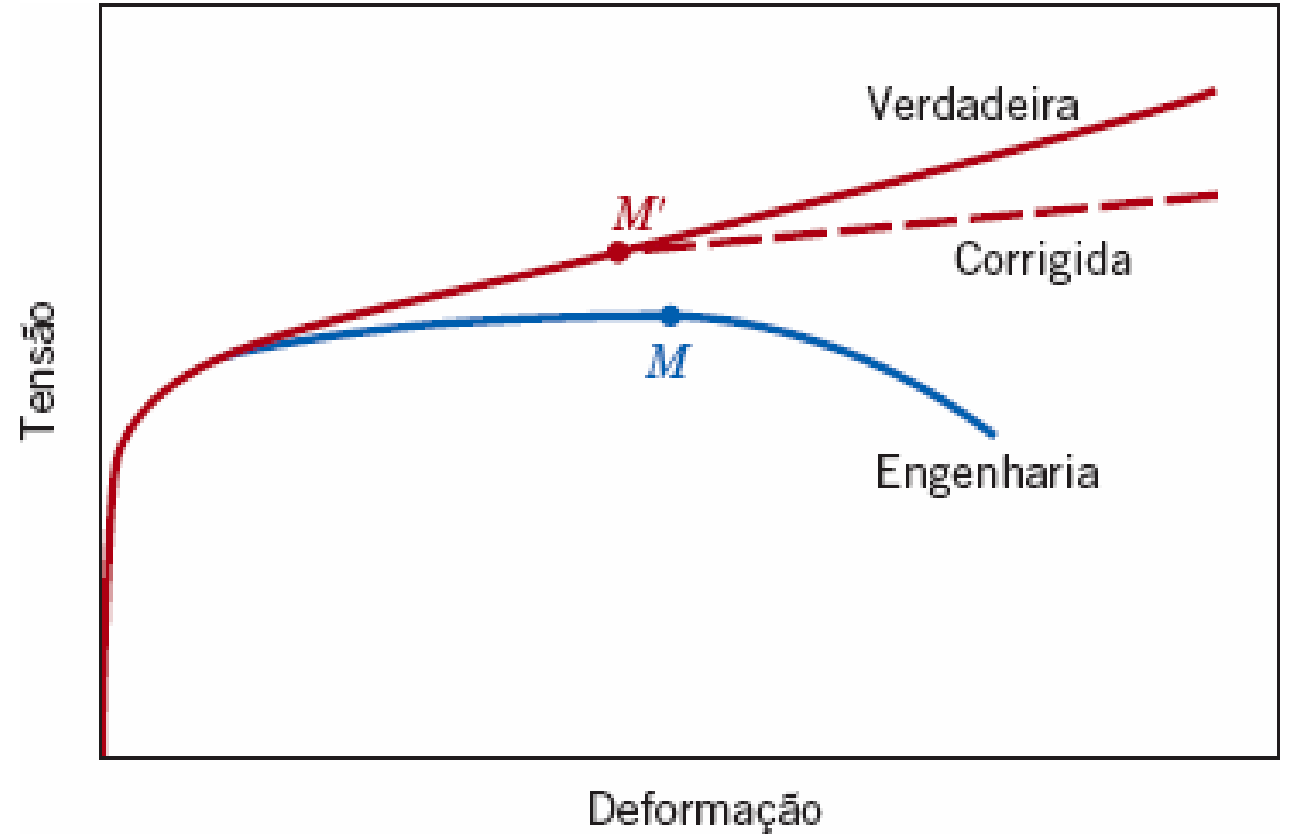
- Conservação de volume

$$A_i l_i = A_0 l_0$$

- Tensão e deformação verdadeiras:

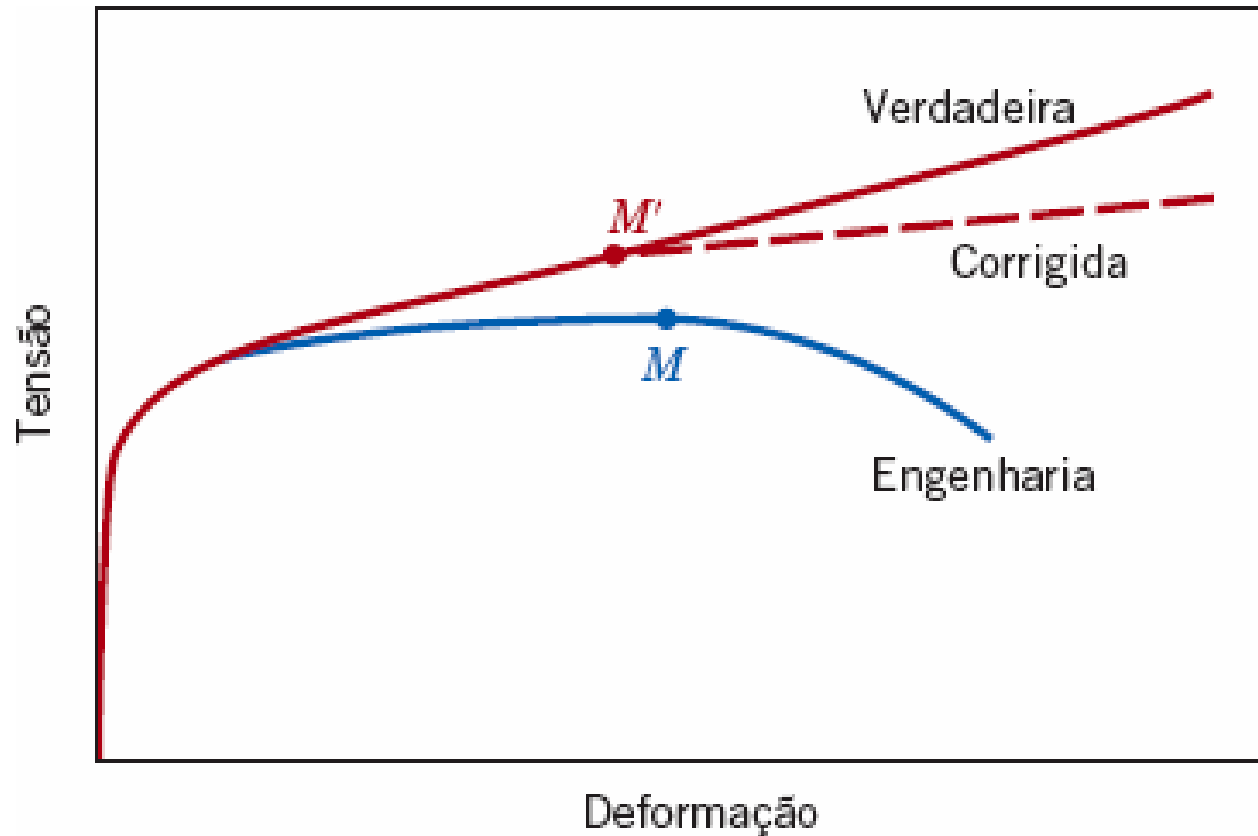
$$\sigma_v = \sigma(1 + \epsilon)$$

$$\epsilon_v = \ln(1 + \epsilon)$$



- Tensão corrigida (complexo estado de tensão).

# Tensão e deformação verdadeira



- Para alguns metais e ligas (eq. de Hollomon):

$$\sigma_v = k \epsilon_v^n$$

Onde K e n são constantes .

- Válido do início da deformação plástica até o de início do pescoço
- O parâmetro n é o **coeficiente de encruamento** e possui valor entre 0 e 1. O coeficiente de encruamento é uma medida da capacidade do material encruar ( ou seja, a capacidade do material aumenta sua resistência quando deformado).

# Tensão e deformação verdadeira

Material	n	K	
		MPa	psi
Aço de baixo teor de carbono (aço doce) (recozido)	0,21	600	87.000
Liga 4340 (revenido a 315°C)	0,12	2650	385.000
Aço inoxidável 304 (recozido)	0,44	1400	205.000
Cobre (recozido)	0,44	530	76.500
Latão naval (recozido)	0,21	585	85.000
Liga de alumínio 2024 (tratada termicamente — T3)	0,17	780	113.000
Liga de magnésio AZ-31B (recozida)	0,16	450	66.000

- Para alguns metais e ligas (eq. de Hollomon):

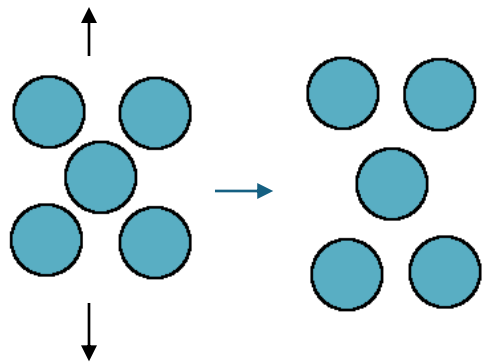
$$\sigma_v = k\varepsilon_v^n$$

Onde K e n são constantes .

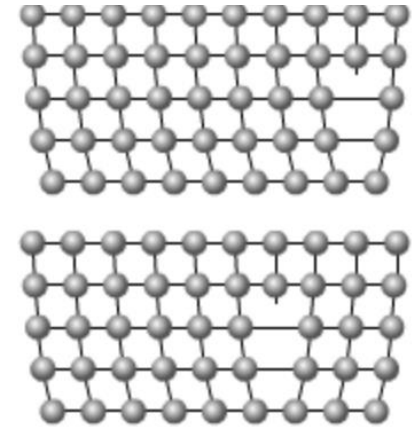
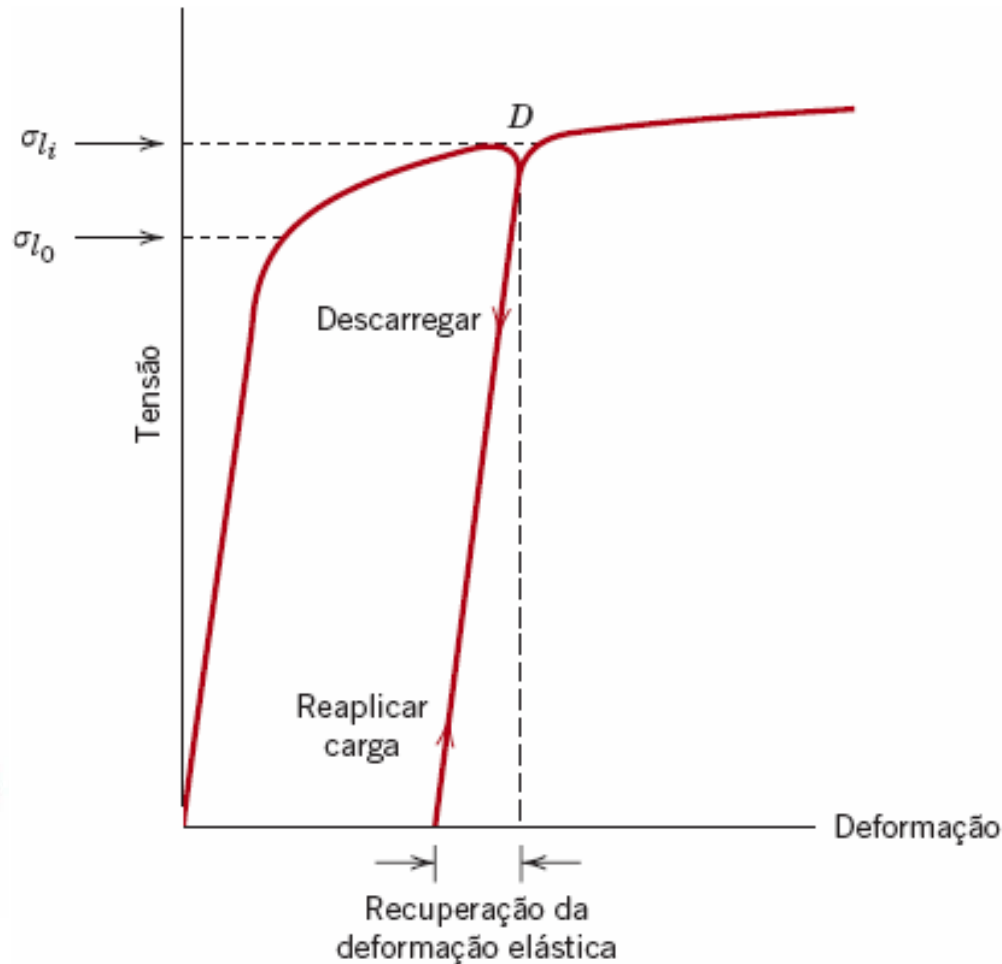
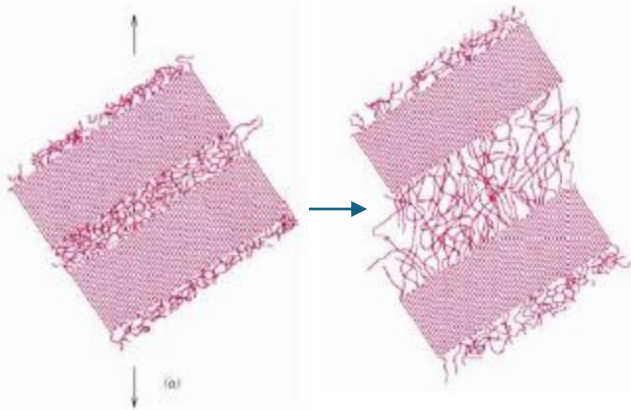
- Válido do início da deformação plástica até o de início do pescoço
- O parâmetro n é o **coeficiente de encruamento** e possui valor entre 0 e 1. O coeficiente de encruamento é uma medida da capacidade do material encruar ( ou seja, a capacidade do material aumenta sua resistência quando deformado).

# Recuperação elástica após plástica

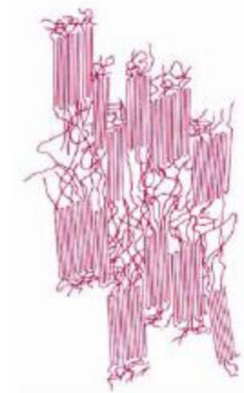
- Tensão na qual os mecanismos irreversíveis começam a operar!

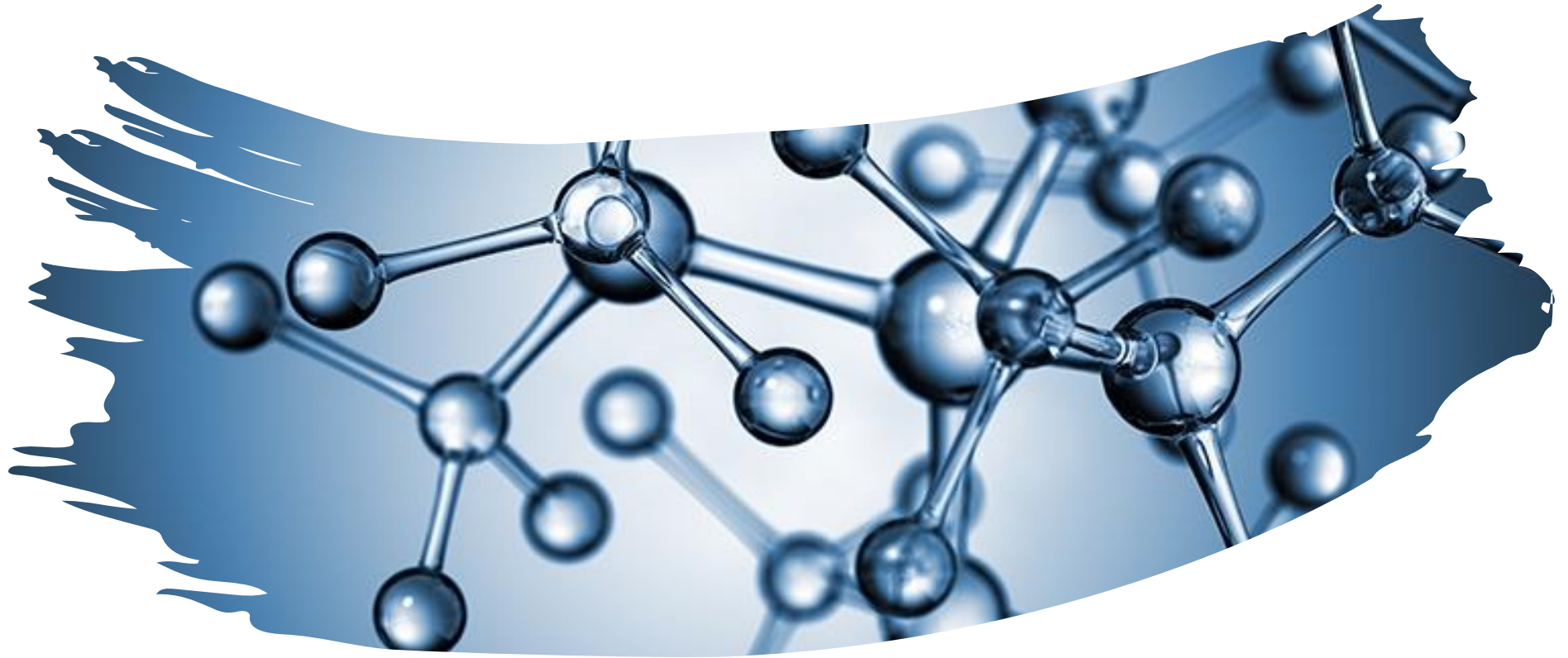


Mecanismos reversíveis



Mecanismos irreversíveis

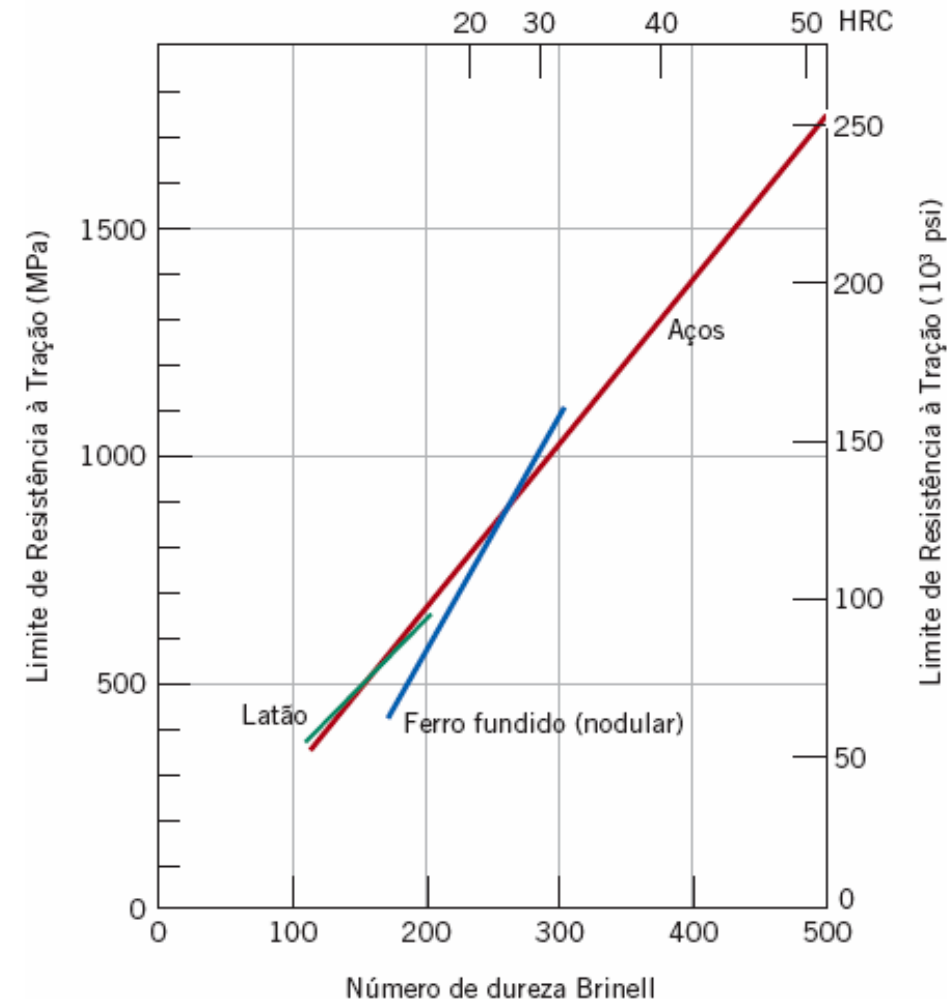




### **3. Durezza**

# Dureza

- Dureza: medida da resistência de um material a uma deformação plástica localizada (por exemplo, uma pequena impressão ou um risco)
- Os ensaios de dureza são realizados com maior frequência que qualquer outro ensaio mecânico por diversas razões:
  1. Eles são simples e baratos — ordinariamente, nenhum corpo de prova especial precisa ser preparado e os equipamentos de ensaio são relativamente baratos.
  2. O ensaio é não destrutivo — o corpo de prova não é fraturado nem excessivamente deformado; uma pequena impressão é a única deformação.
  3. Com frequência, outras propriedades mecânicas podem ser estimadas a partir dos dados de dureza, tal como o limite de resistência à tração

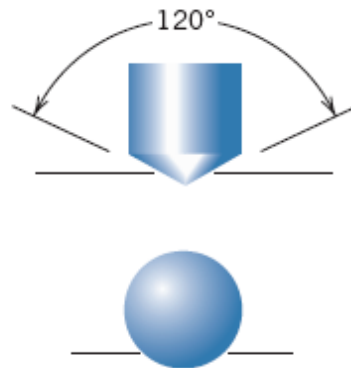


# Ensaio de dureza Rockwell

- Várias escalas diferentes podem ser aplicadas a partir de combinações possíveis de vários penetradores e diferentes cargas, que permitem o ensaio de virtualmente todas as ligas metálicas.
- No ensaio Rockwell, a carga menor é de 10 kg, enquanto as cargas principais são de 60, 100 e 150 kg

Rockwell e Rockwell Superficial

{ Cone de diamante;  
esferas de aço  
com diâmetros de  
 $\frac{1}{16}$ ,  $\frac{1}{8}$ ,  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$  in.



60 kg }  
100 kg } Rockwell  
150 kg }  
15 kg }  
30 kg } Rockwell superficial  
45 kg }

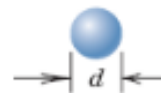
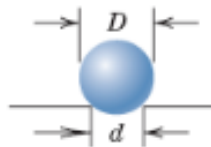


# Ensaio de dureza Brinell

- Um penetrador esférico e duro é forçado contra a superfície do metal a ser ensaiado
- O diâmetro do penetrador de aço endurecido (ou de carbeto de tungstênio) é de 10,00 mm. As cargas-padrão variam entre 500 e 3000 kg, em incrementos de 500 kg; durante um ensaio, a carga é mantida constante por um tempo especificado (entre 10 e 30 s).

Brinell

Esfera de aço ou  
carbeto de tungstênio  
com 10 mm



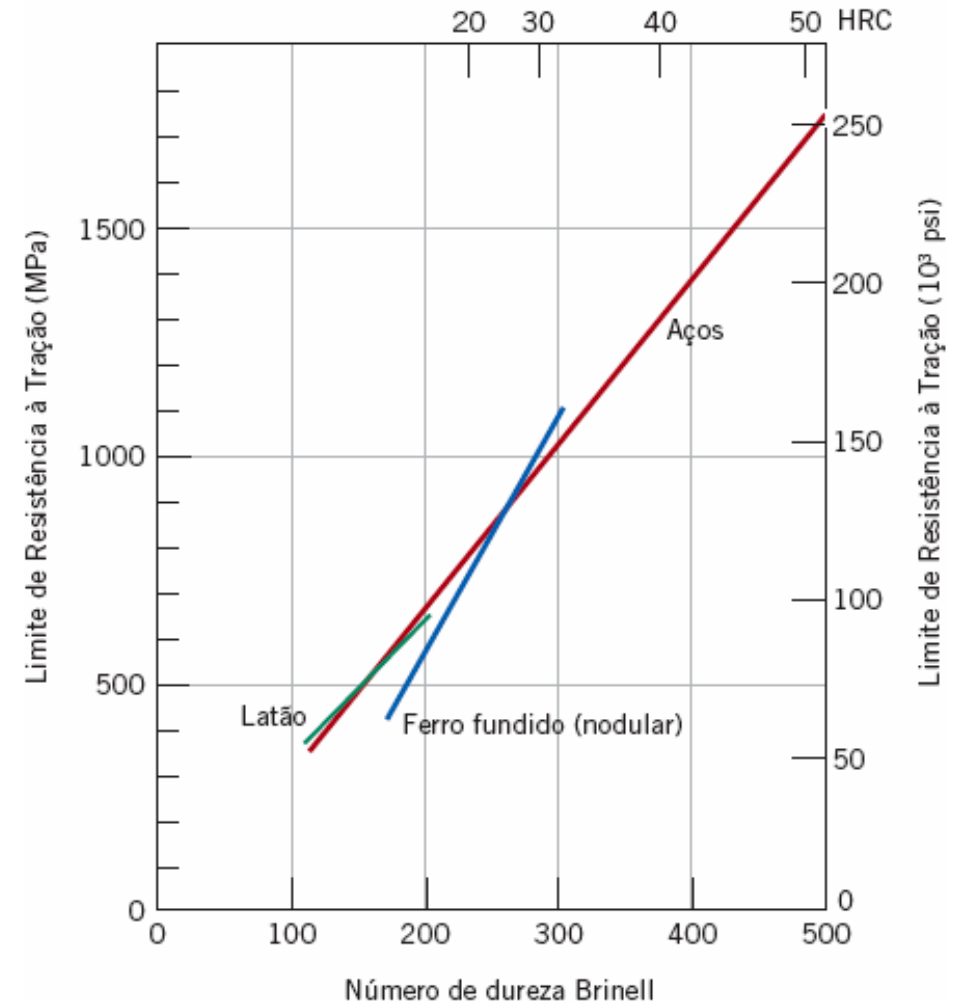
$P$

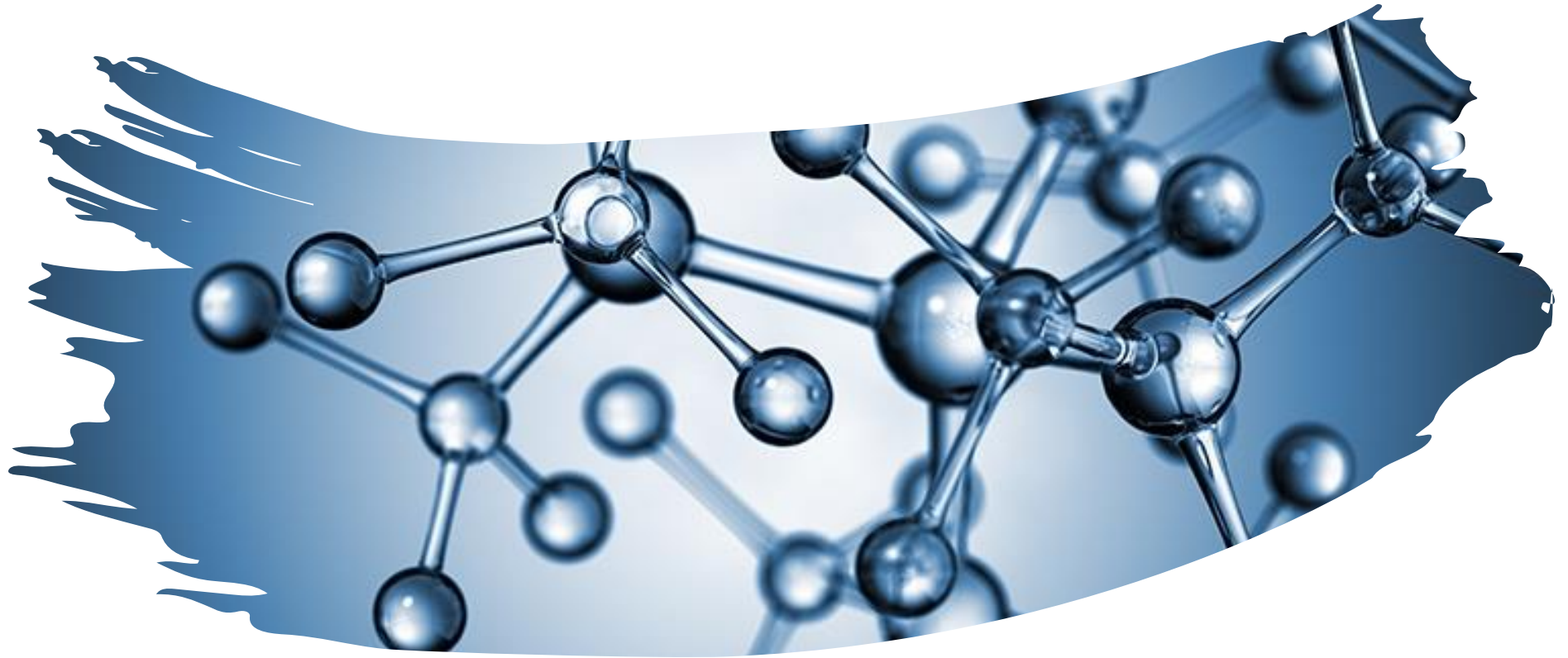
$$HB = \frac{2P}{\pi D [D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$$

# Dureza e limite de resistência à tração

- Tanto o limite de resistência à tração quanto a dureza são indicadores da resistência de um metal à deformação plástica

$$LRT \text{ (MPa)} = 3,45 \times HB$$

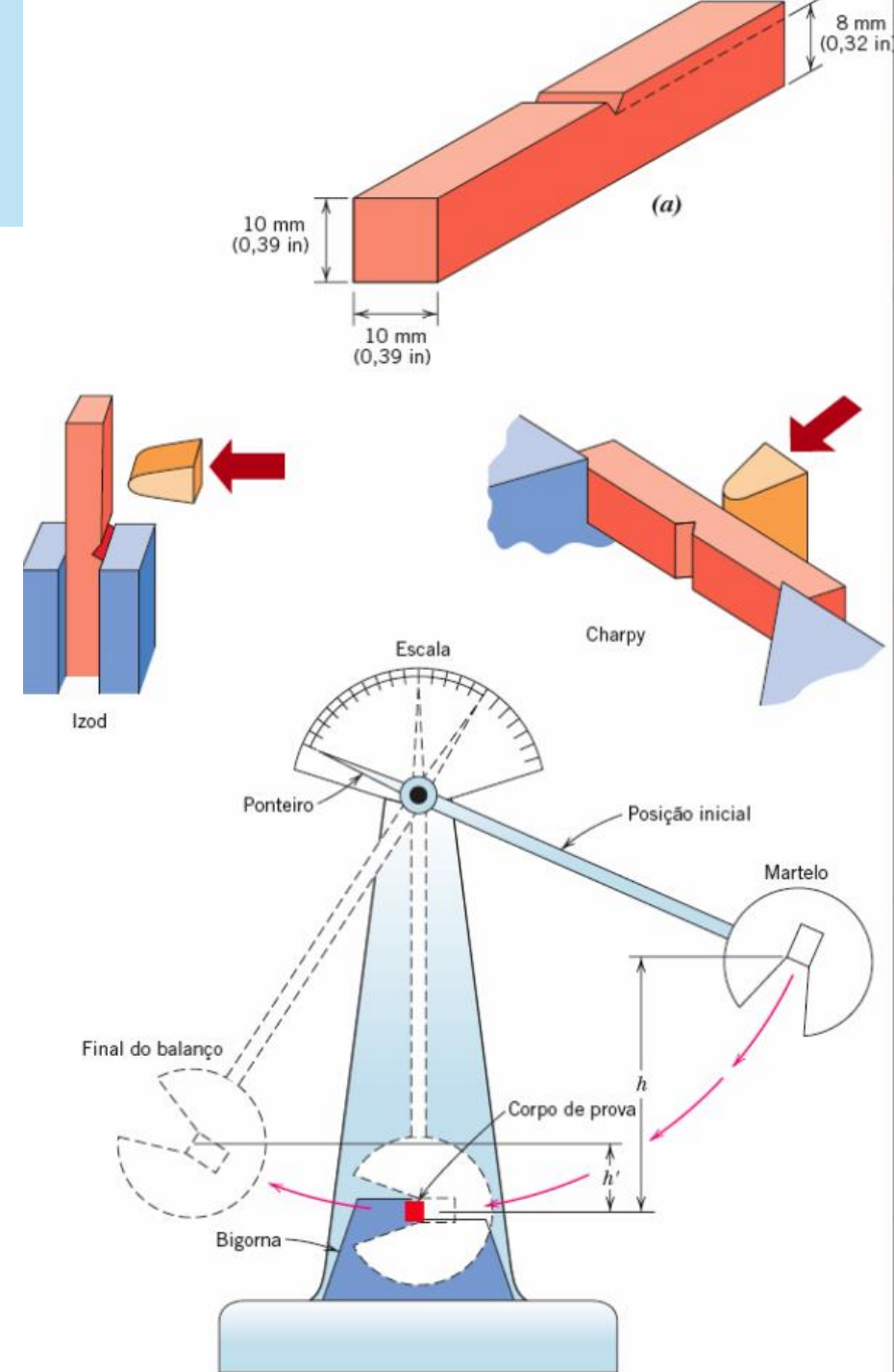




## **4. Resistência ao impacto**

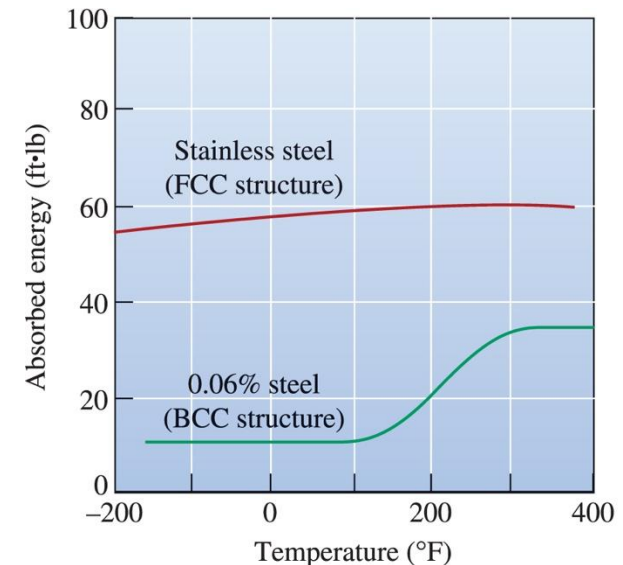
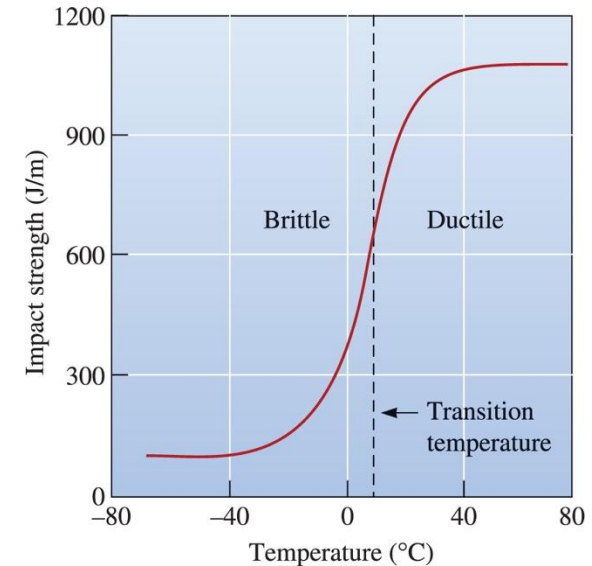
# Ensaio de impacto

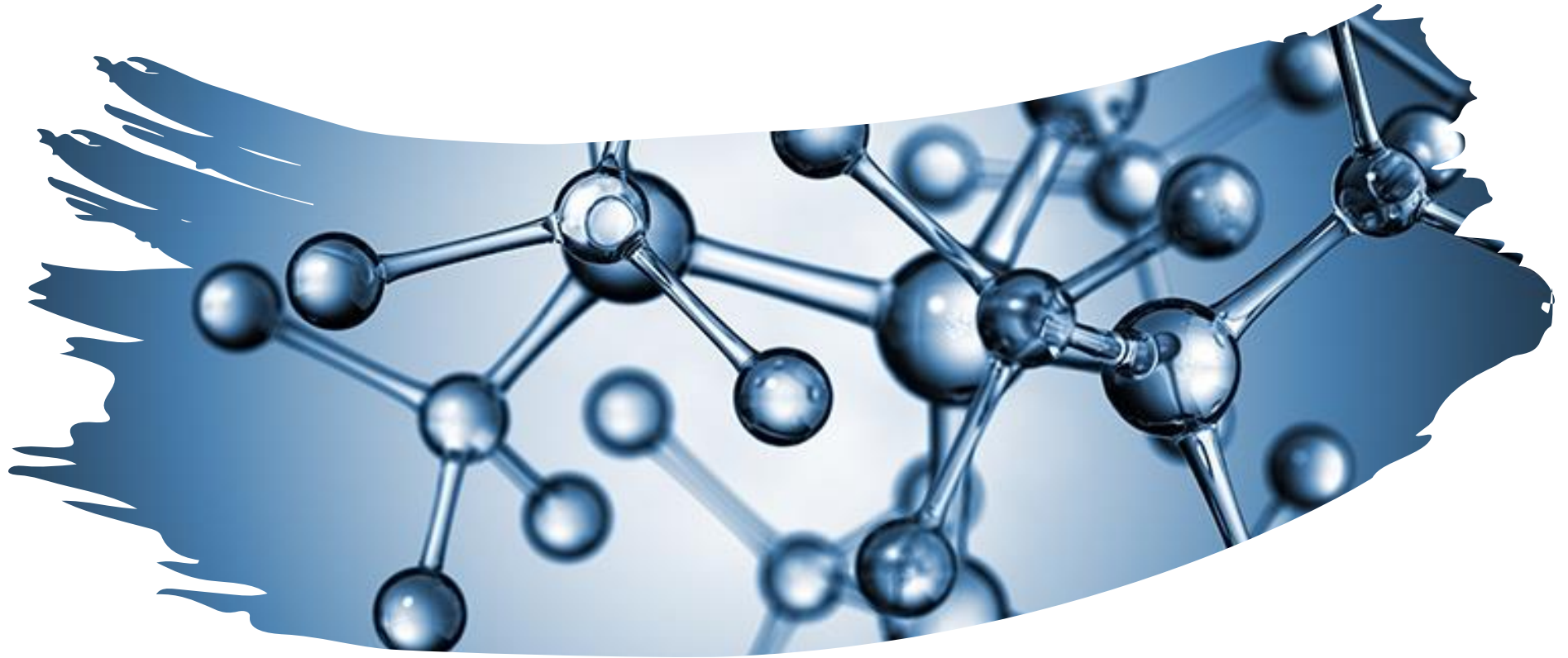
- Dois ensaios padrões o **Charpy** e o **Izod**.
- São utilizados para medir a **energia de impacto**, algumas vezes chamada de **tenacidade ao entalhe**.
- Nos dois ensaios, o corpo-de-prova possui o formato de uma barra com seção reta quadrada, na qual é usinada um entalhe na em forma de “V”.
- A carga é aplicada por meio de um martelo de pêndulo balanceado, na forma de um impacto instantâneo.
- A absorção de energia (em **J**) é calculada com base na diferença de altura do martelo quando solto e na altura que ele chega após o impacto. Está relacionado a **tenacidade** do material.
- Os resultados dos ensaios de impacto são de natureza **qualitativa** e são de pouca utilidade para projetos de engenharia.



# Transição Frágil - Dúctil

- Uma das principais funções dos ensaios **Charpy** e **Izod** é determinar se um material experimenta ou não uma **transição de dúctil para frágil** com a diminuição da temperatura e, se esse for o caso, das faixas de temperatura ao longo das quais isso acontece.
- Os metais com estrutura cristalina **CFC** e a maioria dos metais com estrutura **HC** não experimentam **transição dúctil-frágil**.
- A transição dúctil-frágil é tipicamente experimentada em metais com estrutura cristalina **CCC**.

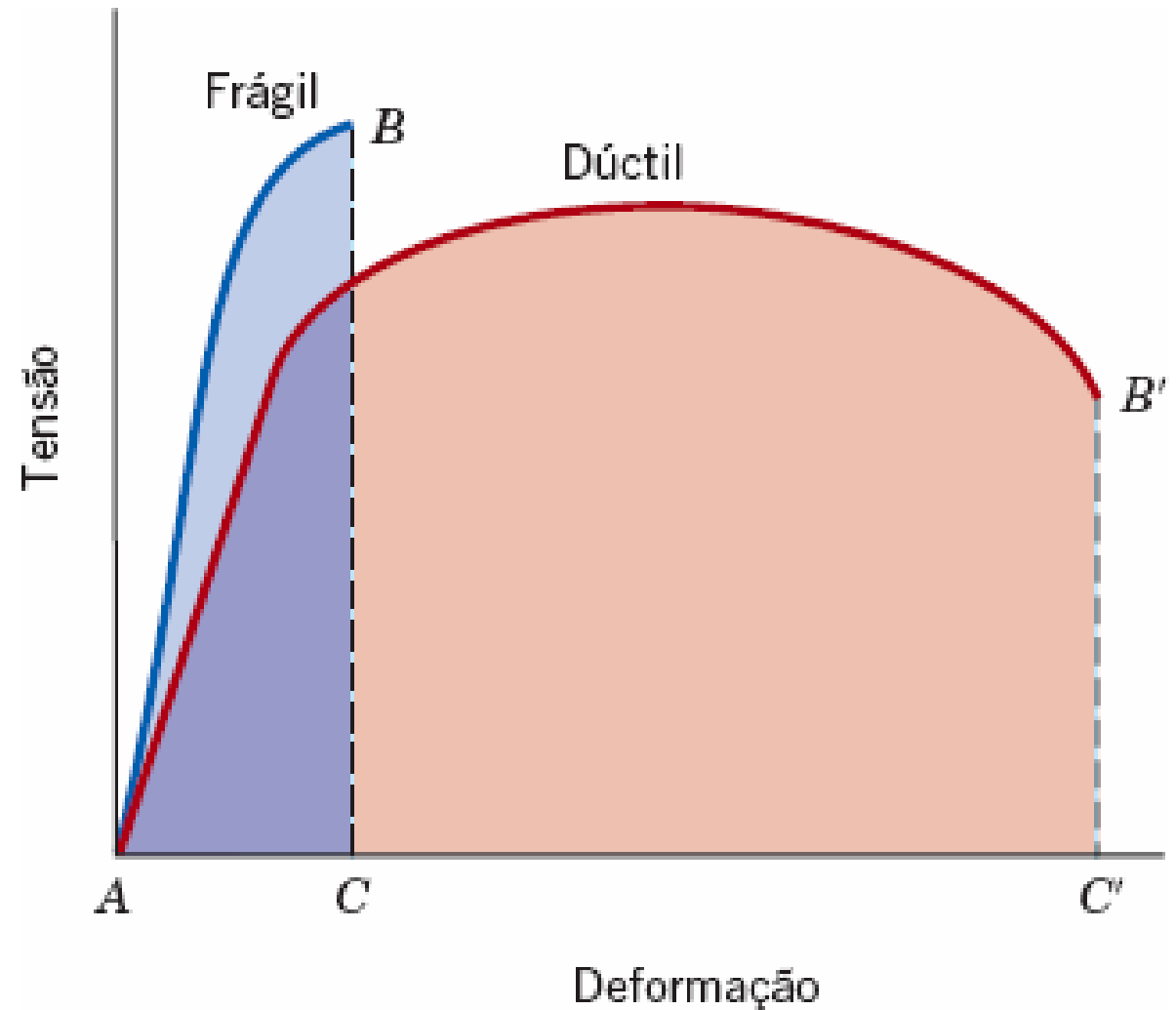




## **5. Falhas**

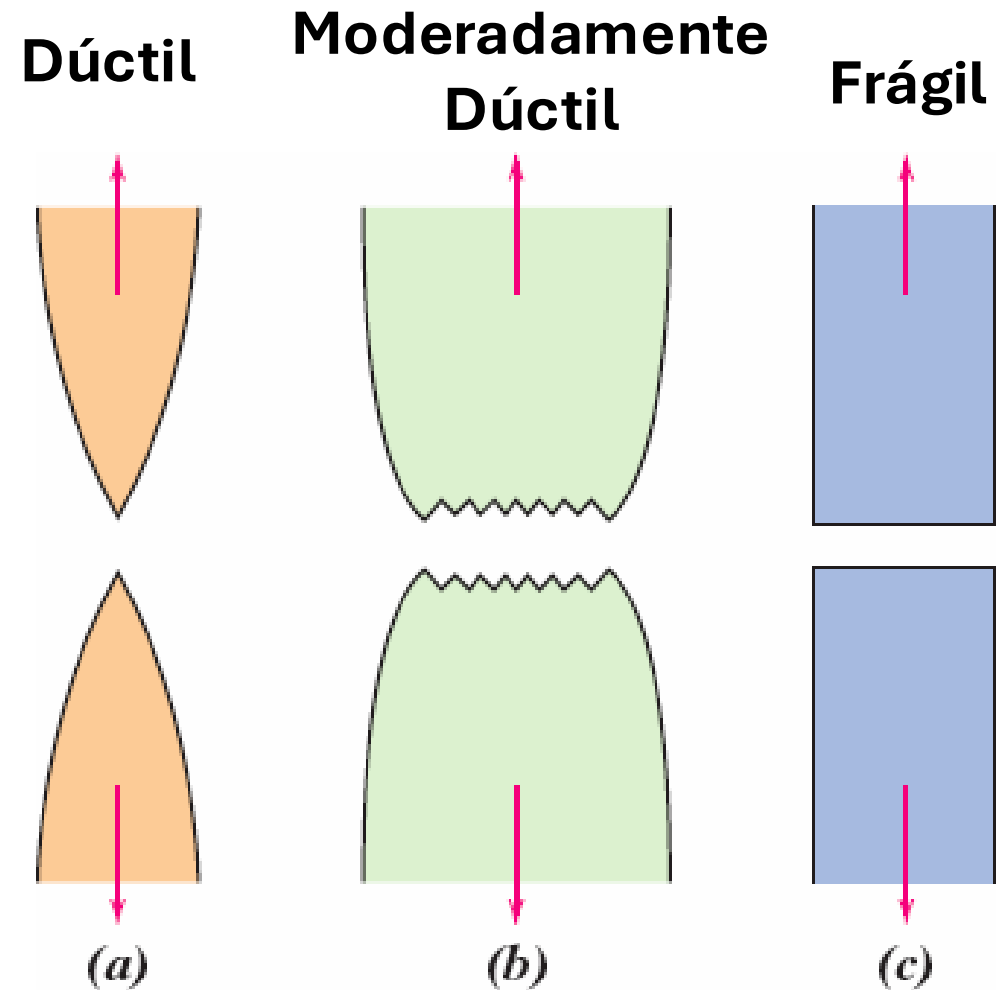
# Falhas

- A fratura simples consiste na separação de um corpo em duas ou mais partes em resposta à imposição de uma tensão estática.
- Uma fratura também pode ocorrer em razão da fadiga (quando são impostas tensões cíclicas) e da fluência (deformação que varia com o tempo e que ocorre normalmente sob temperaturas elevadas).
- Os metais dúcteis exibem tipicamente uma deformação plástica substancial (grande absorção de energia antes da fratura)
- Uma fratura frágil, há normalmente pouca ou nenhuma deformação plástica e baixa absorção de energia.



# Falhas

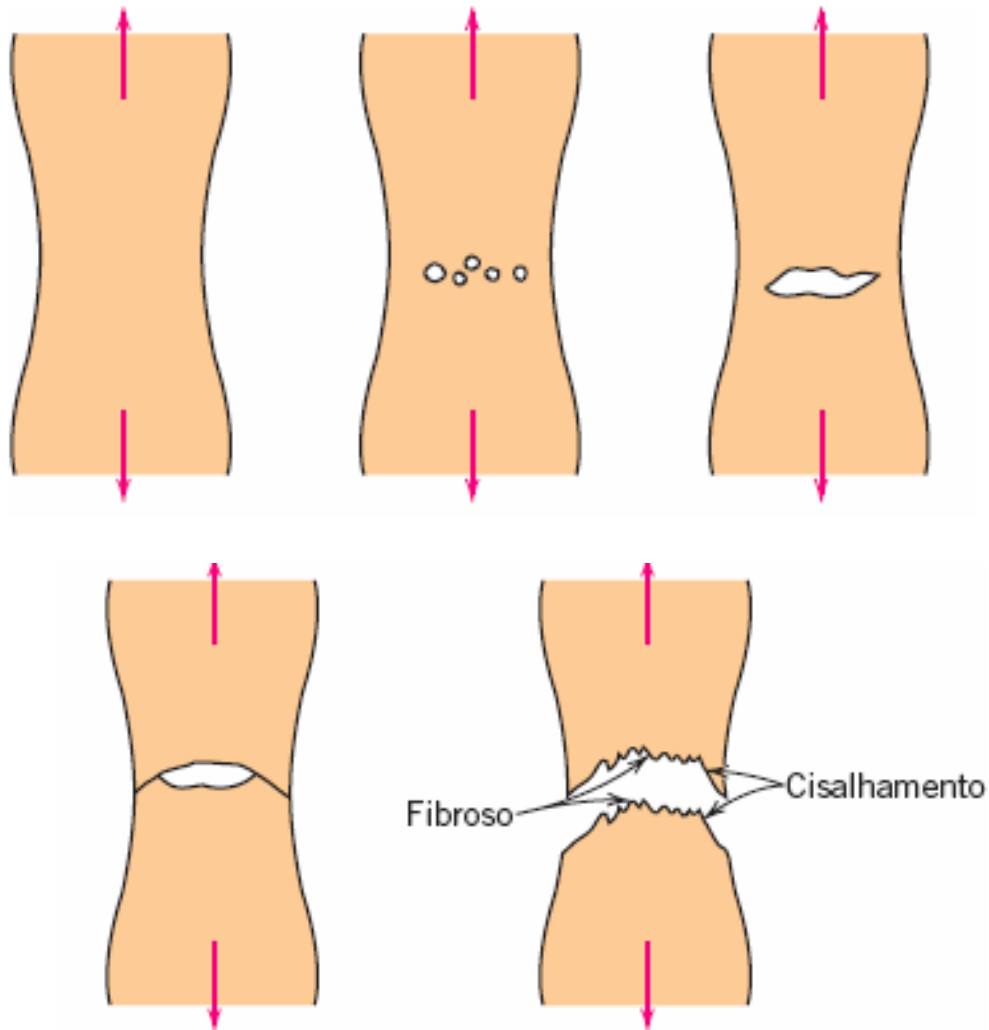
- A fratura simples consiste na separação de um corpo em duas ou mais partes em resposta à imposição de uma tensão estática.
- Uma fratura também pode ocorrer em razão da fadiga (quando são impostas tensões cíclicas) e da fluência (deformação que varia com o tempo e que ocorre normalmente sob temperaturas elevadas).
- Os metais dúcteis exibem tipicamente uma deformação plástica substancial (grande absorção de energia antes da fratura)
- Uma fratura frágil, há normalmente pouca ou nenhuma deformação plástica e baixa absorção de energia.





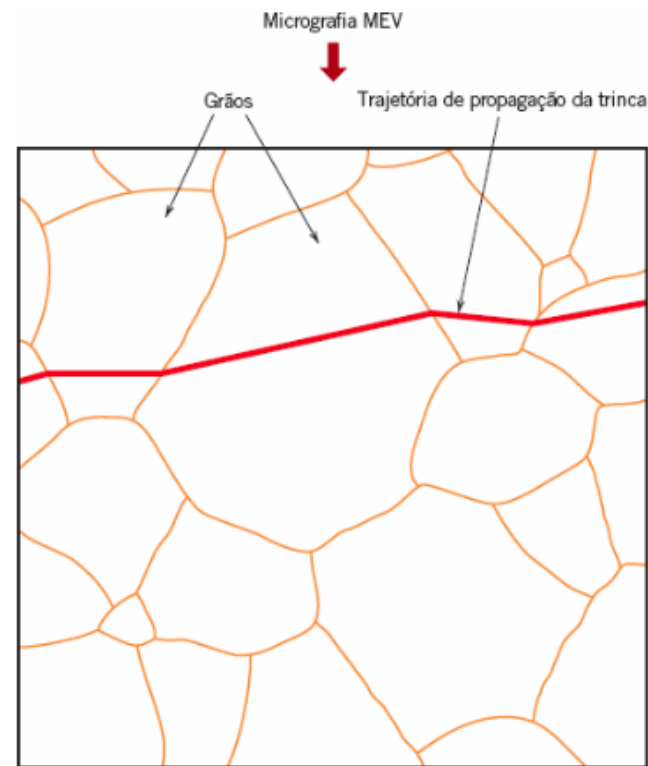
# Fratura Dúctil

- Formação e coalescimento de vazios após muita deformação
- Não é o foco da mecânica da fratura!

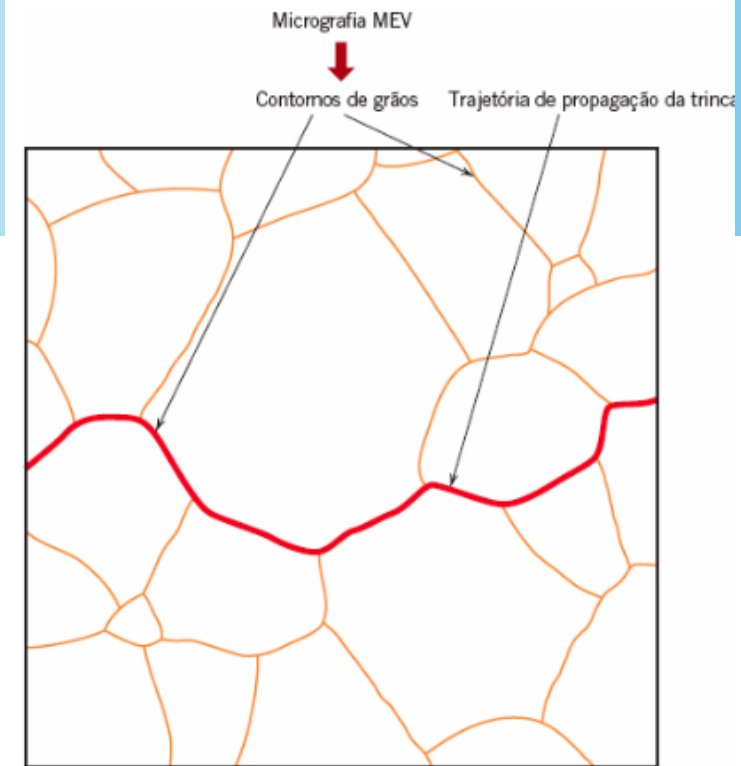
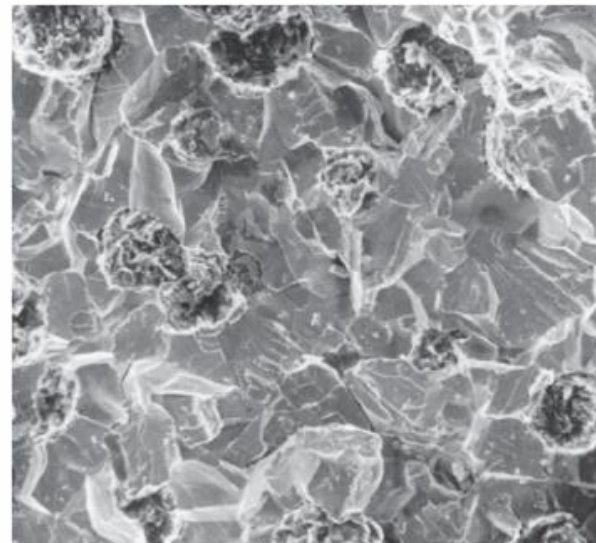


# Fratura frágil

- Clivagem ou transgranular – trinca se propaga pelo material atravessando os grãos.
- Intergranular – trinca contorna os grãos.
- Foco da Mecânica da Fratura!



Frágil - Clivagem



Frágil - Intergranular



# Take-home message...

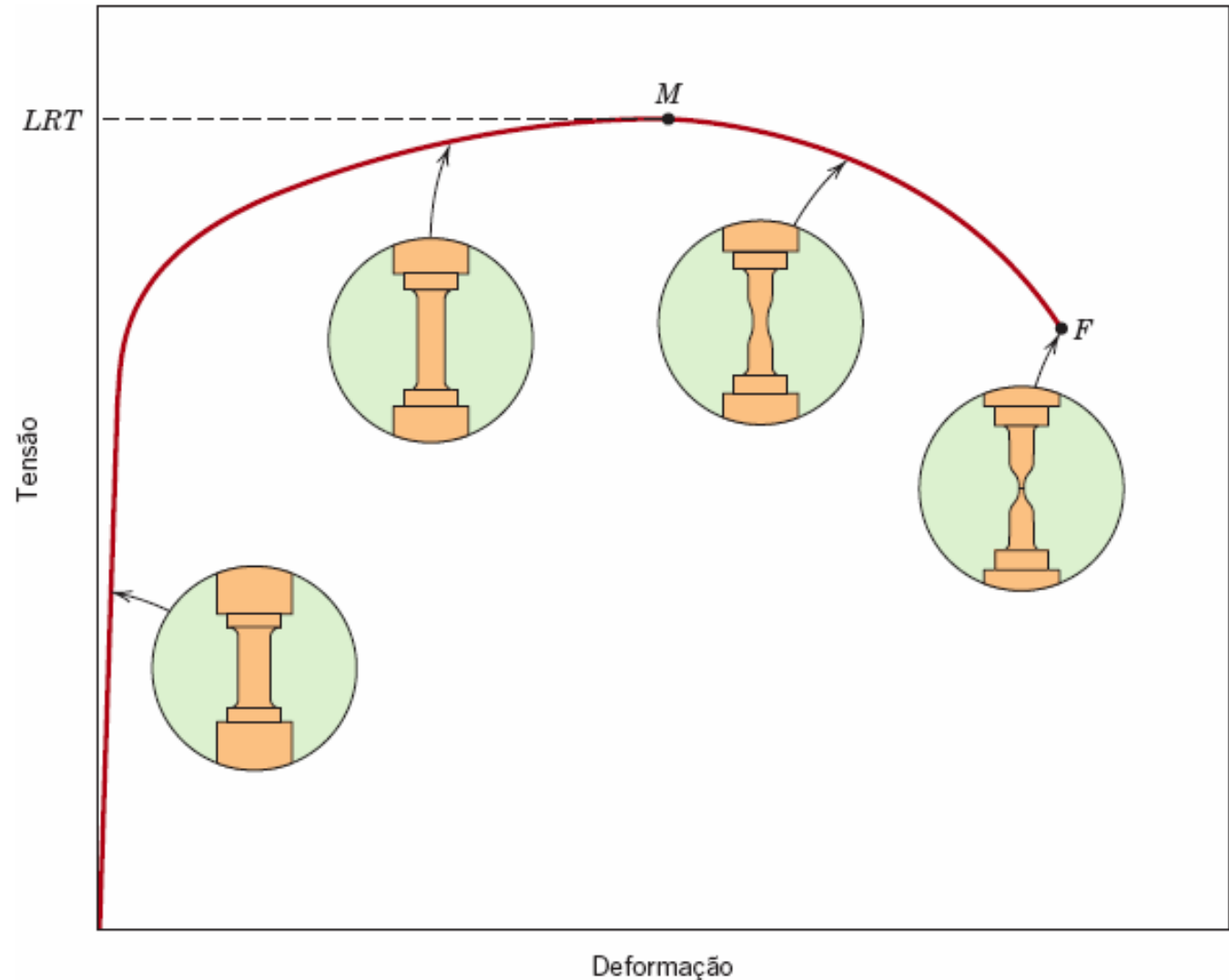
## 1. Tensão deformação

- Tensão de Engenharia:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \text{ [MPa]}$$

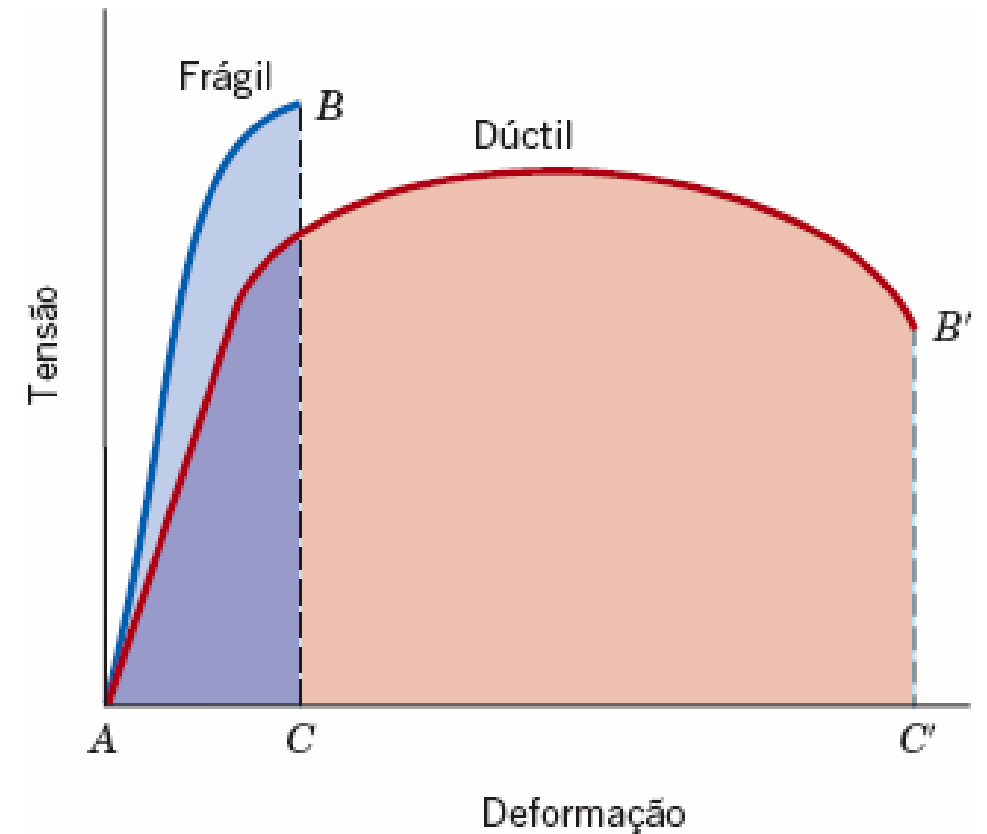
- Deformação de Engenharia:

$$\varepsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0}$$



# Take-home message...

1. Tensão deformação
2. Comportamento tensão-deformação
  1. Deformação elástica/plástica
  2. Escoamento, resistência à tração
  3. Ductilidade, fragilidade
  4. Resiliência, tenacidade

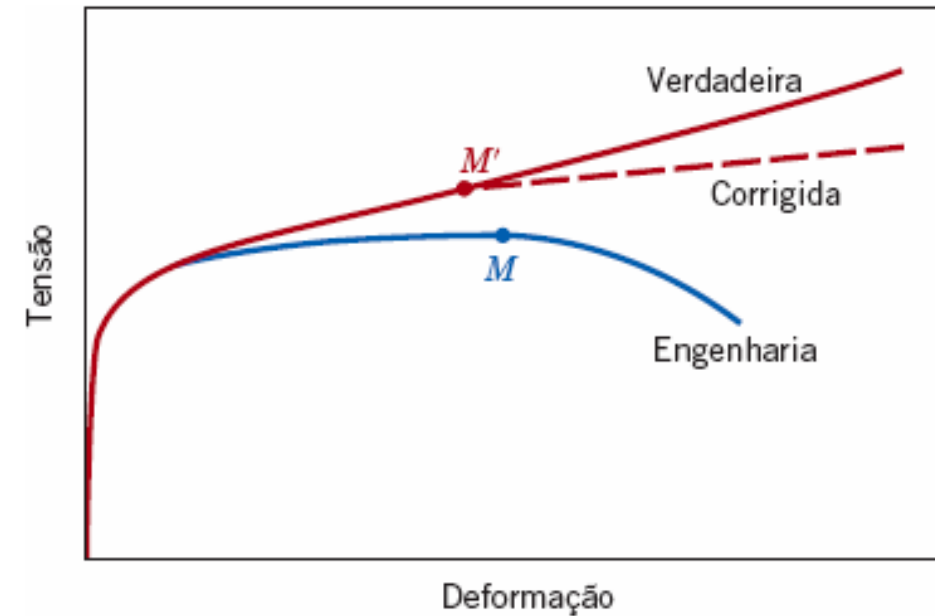


# Take-home message...

1. Tensão deformação
2. Comportamento tensão-deformação
  1. Deformação elástica/plástica
  2. Escoamento, resistência à tração
  3. Ductilidade, fragilidade
  4. Resiliência, tenacidade
3. Tensão e deformação verdadeiras

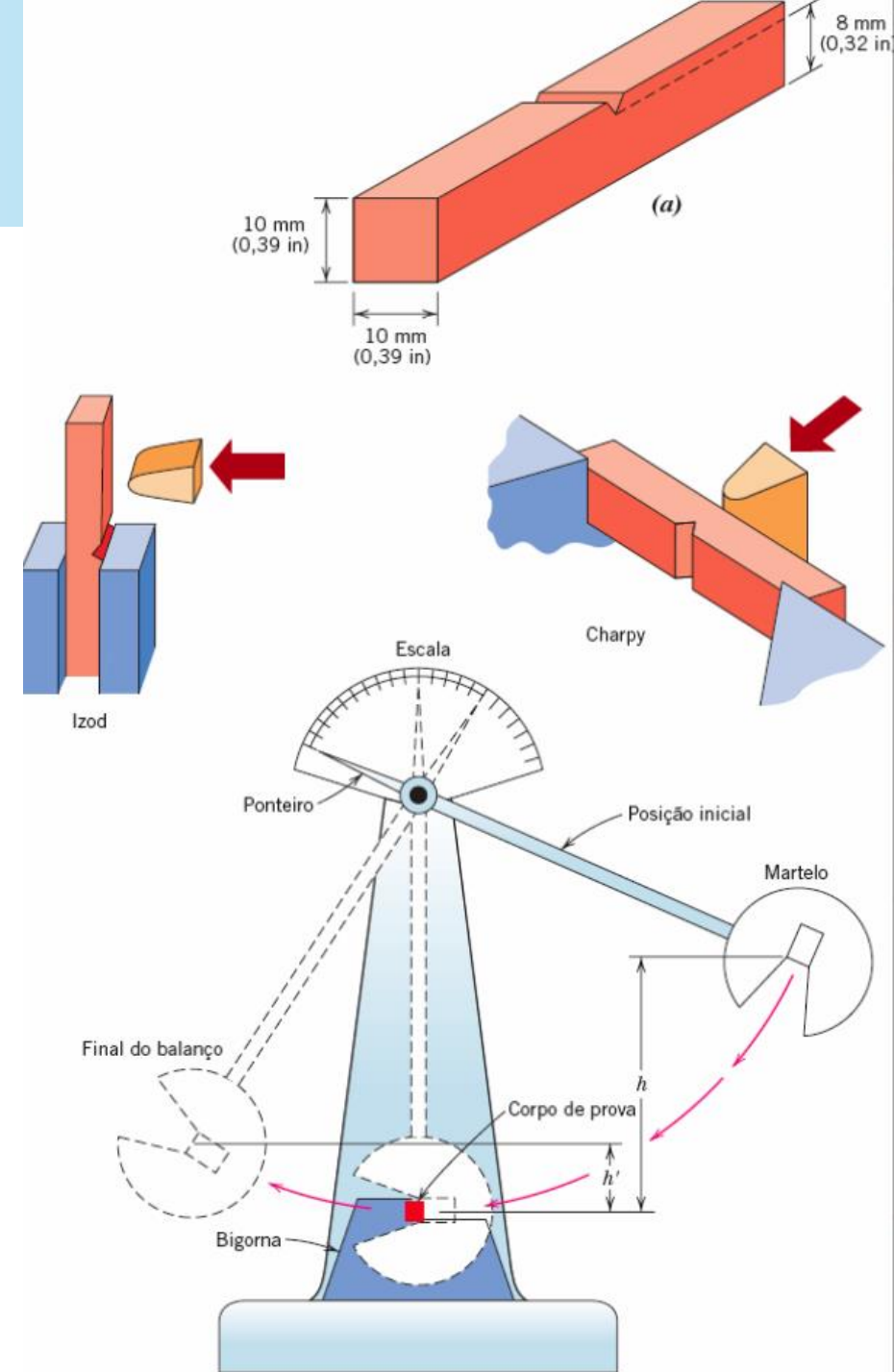
$$\sigma_v = \sigma(1 + \varepsilon)$$

$$\varepsilon_v = \ln(1 + \varepsilon)$$



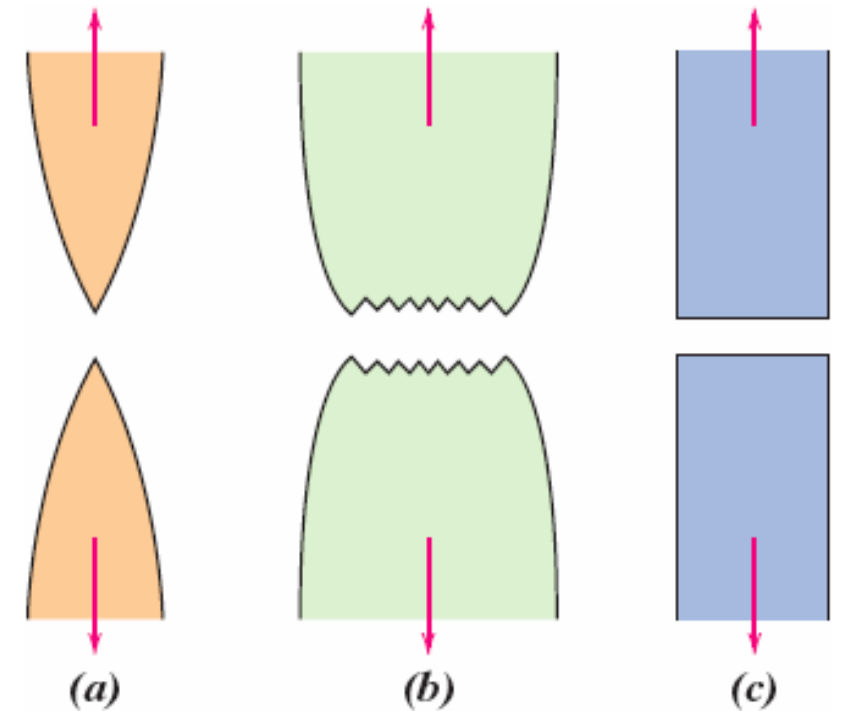
# Take-home message...

1. Tensão deformação
2. Comportamento tensão-deformação
  1. Deformação elástica/plástica
  2. escoamento, resistência à tração
  3. Ductilidade, fragilidade
  4. Resiliência, tenacidade
3. Tensão e deformação verdadeiras
4. Dureza e resistência ao impacto



# Take-home message...

1. Tensão deformação
2. Comportamento tensão-deformação
  1. Deformação elástica/plástica
  2. Escoamento, resistência à tração
  3. Ductilidade, fragilidade
  4. Resiliência, tenacidade
3. Tensão e deformação verdadeiras
4. Dureza e resistência ao impacto
5. Falhas



# Próxima aula...

## Mecanismos de aumento de resistência

