

# CIÊNCIAS DOS MATERIAIS

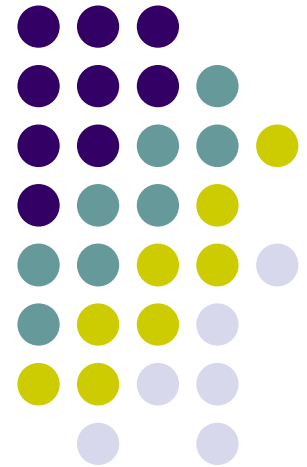
---

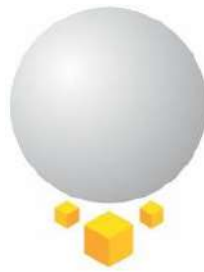
## Capítulo I

Introdução aos materiais na engenharia

**Prof. Dr. André Carlos Silva**

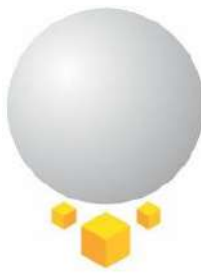
Universidade Federal de Catalão





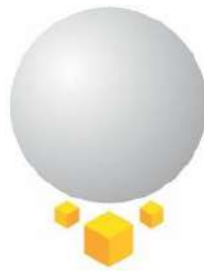
# 1. INTRODUÇÃO

- A disciplina de **ciência dos materiais** envolve investigação das correlações que existem entre as estruturas e propriedades de materiais.
- Em contraste, **engenharia de materiais** é, com base nestas correlações estrutura-propriedade, o projeto ou a engenharia da estrutura de um material para produzir um predeterminado conjunto de propriedades.



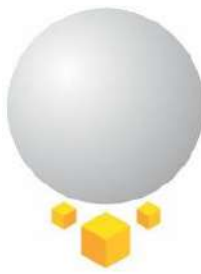
# 1. INTRODUÇÃO

- A **estrutura** de um material usualmente relaciona-se ao arranjo de seus componentes internos.
- Estrutura subatômica envolve elétrons dentro dos átomos individuais e interações com o seu núcleo.



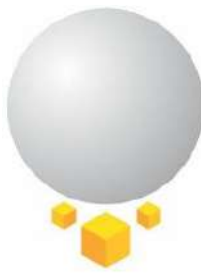
# 1. INTRODUÇÃO

- Num nível atômico, estrutura abrange a organização dos átomos ou moléculas entre si.
- O próximo reino estrutural maior, que contém grandes grupos de átomos que estão normalmente aglomerados entre si, é denominado **microscópico**, significando aquilo que é submetido à observação direta usando algum tipo de microscópio.



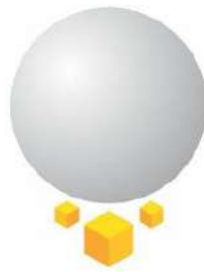
# 1. INTRODUÇÃO

- Finalmente, os elementos estruturais que podem ser visto com olho nu são denominados ***macroscópicos***.



# 1. INTRODUÇÃO

- Enquanto usado em serviço, todos os materiais são expostos a estímulos externos que evocam algum tipo de resposta.
- Por exemplo, uma amostra submetida a forças irá experimentar deformação, ou uma superfície de metal polido refletirá luz.



# 1. INTRODUÇÃO

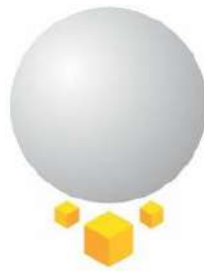
- Propriedade é um traço (característica) de um material em termos do tipo e magnitude de resposta a um específico estímulo imposto.
- Geralmente, definições de propriedades são feitas independente da forma e tamanho do material.



# 1. INTRODUÇÃO

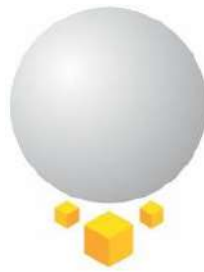
- Virtualmente todas as importantes propriedades de materiais sólidos podem ser grupadas em 6 diferentes categorias:
  - mecânica;
  - elétrica;
  - térmica;
  - magnética;
  - ótica, e
  - deteriorativa.





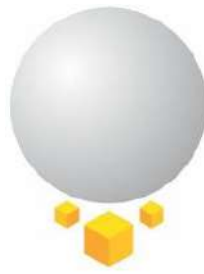
# 1. INTRODUÇÃO

- Para cada uma existe um tipo característico de estímulo capaz de provocar diferentes respostas.
- Propriedades ***mecânicas*** relacionam deformação a uma carga ou força aplicada; exemplos incluem módulo elástico e resistência mecânica.



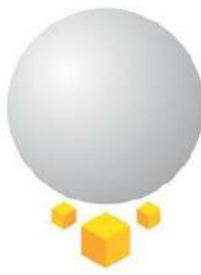
# 1. INTRODUÇÃO

- Para propriedades ***elétricas***, tais como condutividade elétrica e constante dielétrica, o estímulo é um campo elétrico.
- O comportamento ***térmico*** de sólidos pode ser representado em termos de capacidade calorífica e condutividade térmica.



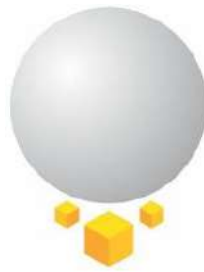
# 1. INTRODUÇÃO

- Propriedades ***magnéticas*** demonstram a resposta de um material à aplicação de um campo magnético.
- Para propriedades ***ópticas***, o estímulo é eletromagnético ou radiação de luz, índice de refração e refletividade são representativas propriedades óticas.



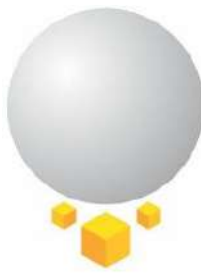
# 1. INTRODUÇÃO

- Finalmente, características ***deteriorativas*** indicam a reatividade química de materiais.



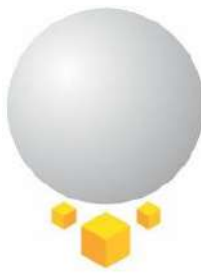
# 1. INTRODUÇÃO

- ***Por que nós estudamos materiais?***
  - Muitos dos cientistas aplicados ou engenheiros estarão uma vez ou outra expostos a um problema de projeto envolvendo materiais.
  - Exemplos poderiam incluir uma engrenagem de transmissão, a superestrutura para um prédio, um componente para refinaria de óleo, ou um "chip" de microprocessador.



# 1. INTRODUÇÃO

- ***Por que nós estudamos materiais?***
  - Naturalmente, cientistas de materiais e engenheiros são especialistas que estão totalmente envolvidos na investigação e projeto de materiais.



# 1. INTRODUÇÃO

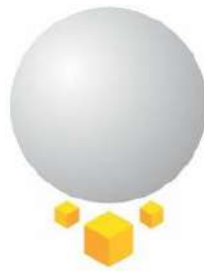
- Muitas vezes, um problema de materiais é a seleção do material certo dentre muitos milhares que são disponíveis.
- Existem vários critérios nos quais a decisão final é normalmente baseada.



# 1. INTRODUÇÃO

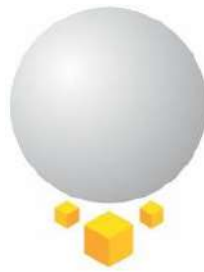
- Antes de mais nada, as condições de serviço devem ser caracterizadas, uma vez que estas ditarão as propriedades requeridas do material.
- Somente em raras ocasiões um material possuirá uma combinação máxima ou ideal de propriedades.





# 1. INTRODUÇÃO

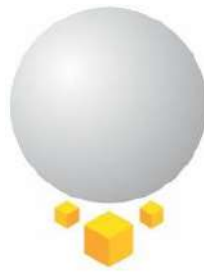
- Assim pode ser necessário perder uma característica para se ter uma outra.
- O exemplo clássico envolve resistência ***mecânica*** e ***ductilidade***: normalmente, um material tendo uma alta resistência mecânica terá apenas uma limitada ductilidade.



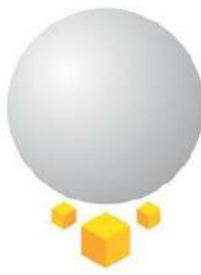
# 1. INTRODUÇÃO

- Em tais casos, um compromisso razoável entre duas ou mais propriedades pode ser necessária.
- Uma segunda consideração de seleção é qualquer deterioração de propriedades de materiais que pode ocorrer durante operação em serviço.

# 1. INTRODUÇÃO

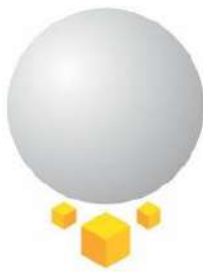


- Por exemplo, significativas reduções em resistência mecânica podem resultar da exposição a temperaturas elevadas ou ambientes corrosivos.



# 1. INTRODUÇÃO

- Finalmente, provavelmente a consideração sobrepujante é a economia: ***quanto custará o produto acabado?***
- Pode-se encontrar um material que tenha um conjunto ideal de propriedades mas seja proibitivamente caro.



# 1. INTRODUÇÃO

- Aqui de novo, algum sacrifício é inevitável.
- O custo de uma peça acabada inclui também qualquer despesa incorrida durante a fabricação para produzir a forma desejada.



# 1. INTRODUÇÃO

- Quanto maior for a familiaridade de um engenheiro ou cientista com as várias características e correlações estrutura-propriedade, bem como técnicas de processamento de materiais, tanto mais proficiente e confiável ele ou ela será para fazer boas escolhas de materiais baseadas nestes critérios.



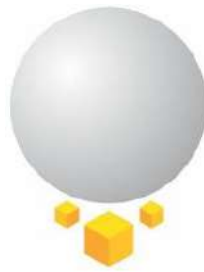
**Um item comum fabricado com três diferentes tipos de materiais são os contêineres de bebidas. Estes podem ser comercializados em latas de alumínio (metal), garrafas de vidro (cerâmica) e de plástico (polímero).**



Fotografia exibindo luz transmitida por três espécimes compostos por óxido de alumínio. Da esquerda para direita: material monocristalino (safira) transparente, material policristalino e altamente denso (sem poros) translúcido e material policristalino com ~5% de porosidade, opaco.

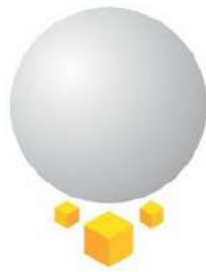


## 2. Classificação dos materiais



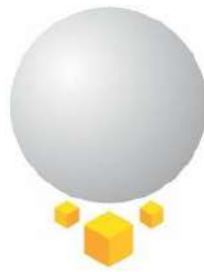
- Materiais sólidos têm sido convenientemente agrupados em três classificações básicas:
  - Metais;
  - Cerâmicas, e
  - Polímeros.

## 2. Classificação dos materiais



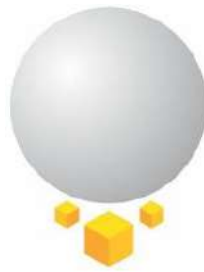
- Este esquema é baseado principalmente na constituição química e na estrutura atômica, e muitos materiais caem num distinto grupamento ou num outro, embora existam alguns intermediários.

## 2. Classificação dos materiais



- Em adição, existem dois outros grupos de importantes materiais de engenharia:
  - Compósitos, e
  - Semicondutores.
- Compósitos consistem de combinações de dois ou mais diferentes materiais, enquanto que semicondutores são utilizados por causa de suas características elétricas não usuais.

# 3. Propriedades mecânicas dos materiais

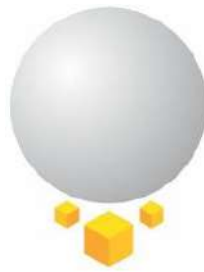


- Muitos materiais, quando em serviço, são submetidos a forças ou cargas.
- Exemplos incluem a liga de alumínio a partir da qual uma asa de avião é construída e o aço do eixo da roda de um automóvel.



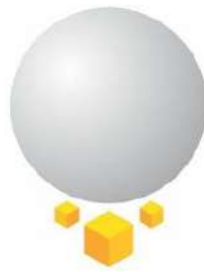


# 3. Propriedades mecânicas dos materiais



- Em tais situações é necessário conhecer as características do material e projetar o elemento estrutural a partir do qual ele é feito, de tal maneira que qualquer deformação resultante não será excessiva e não ocorrerá nenhuma fratura.

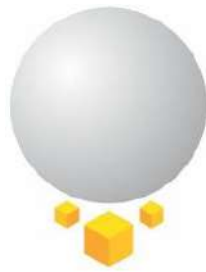
# 3. Propriedades mecânicas dos materiais



- O comportamento mecânico do material reflete a correlação entre sua resposta ou deformação a uma carga ou força aplicada.
- Importantes propriedades mecânicas são resistência mecânica, dureza, ductilidade e rigidez.

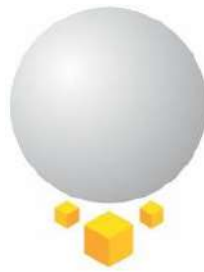


# 3. Propriedades mecânicas dos materiais



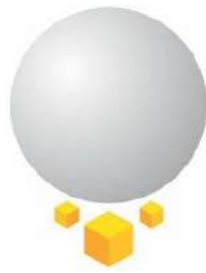
- As propriedades mecânicas de materiais são determinadas pela execução de experimentos laboratoriais que replicam tanto quanto possível as condições de trabalho.
- Fatores a serem considerados incluem a natureza da carga aplicada e a sua duração, bem como as condições ambientais.

# 3. Propriedades mecânicas dos materiais



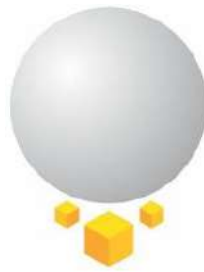
- É possível para a carga que ela seja de tração, compressão, ou cisalhamento, e sua magnitude pode ser constante com o tempo, ou ela pode flutuar continuamente.
- O tempo de aplicação pode ser apenas uma fração de segundo ou ele pode estender-se por um período de muitos anos.

# 3. Propriedades mecânicas dos materiais



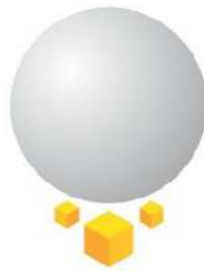
- A temperatura de serviço pode ser um importante fator.

# 3.1. Conceitos de tensão e deformação



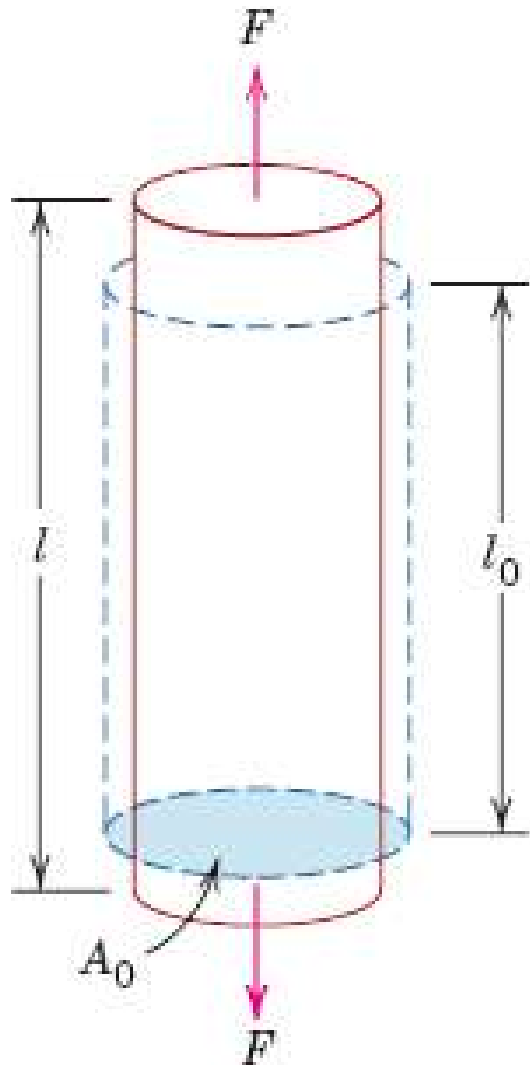
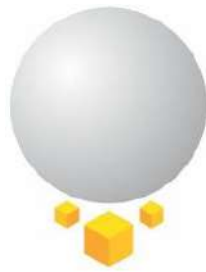
- Se uma carga é estática (ou varia de maneira relativamente lenta com o tempo) e está aplicada uniformemente sobre uma seção reta (ou superfície de um elemento estrutural), o comportamento mecânico pode ser determinado por um teste simples de tensão-deformação.
- Este teste é comumente conduzido para metais à temperatura ambiente.

# 3.1. Conceitos de tensão e deformação

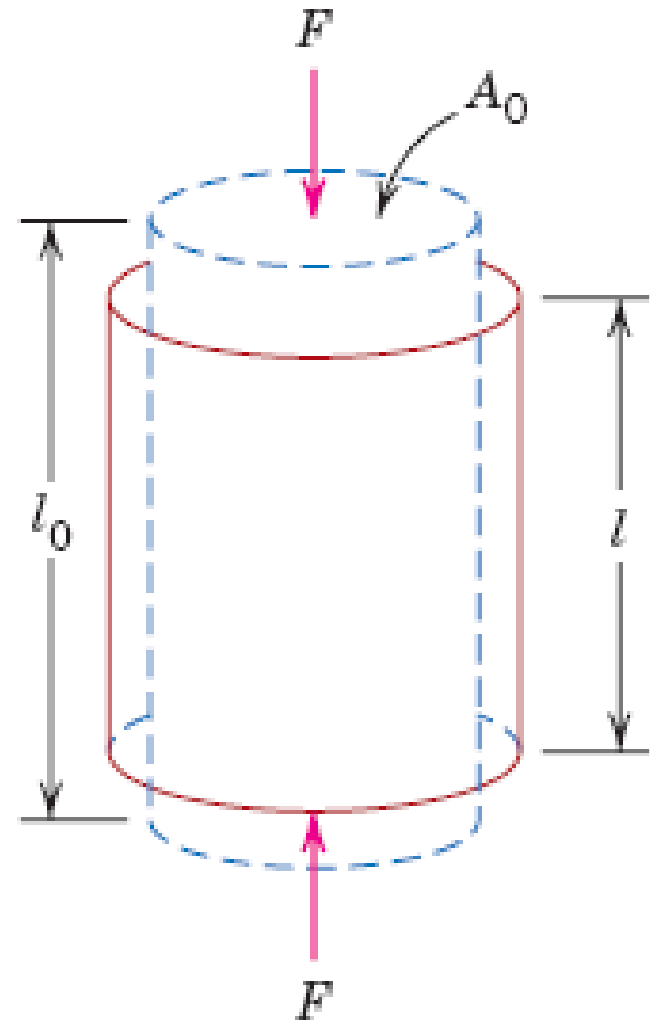


- Existem 3 principais meios nos quais uma carga pode ser aplicada:
  - Tração;
  - Compressão e
  - Cisalhamento.

# 3. Propriedades mecânicas dos materiais

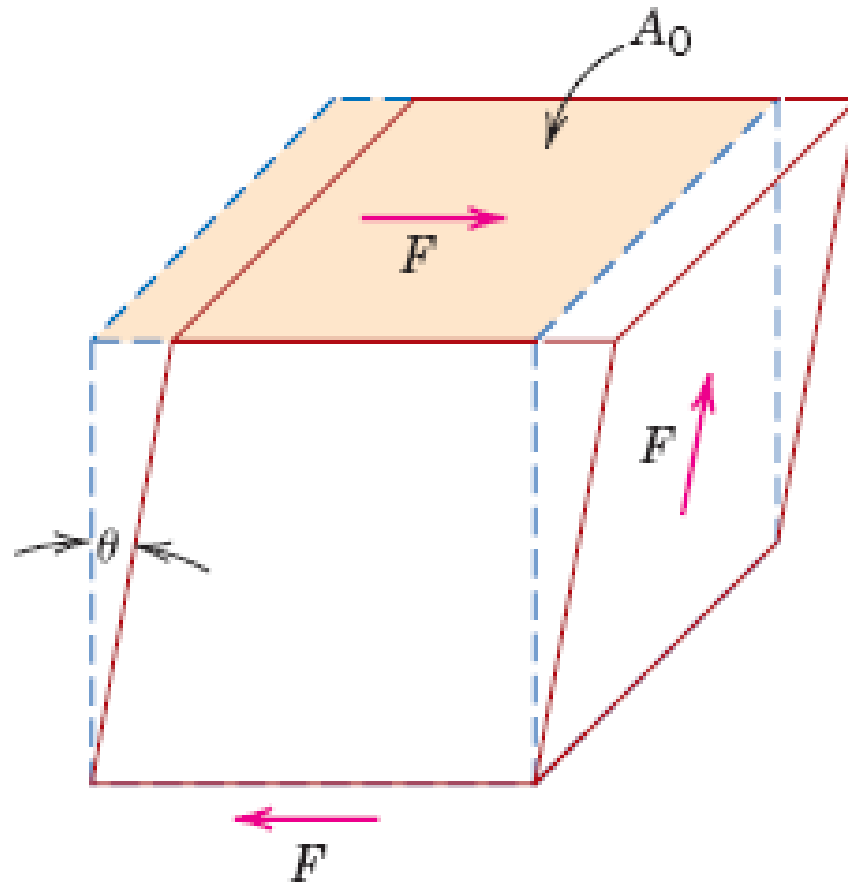
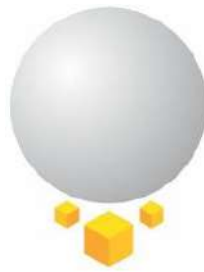


Tração



Compressão

# 3. Propriedades mecânicas dos materiais

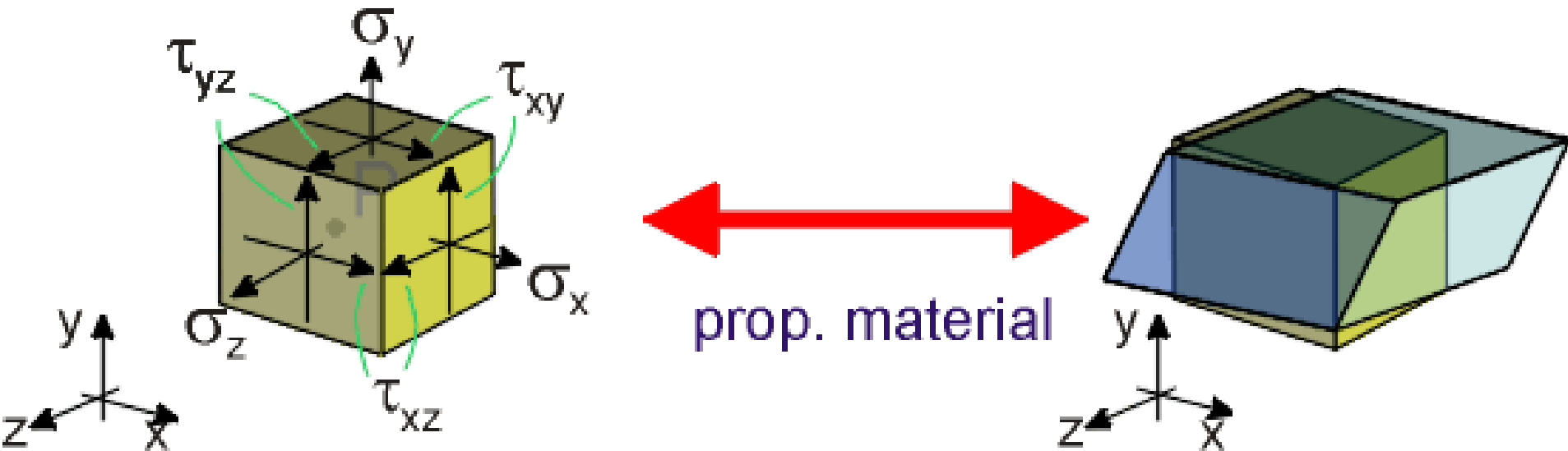
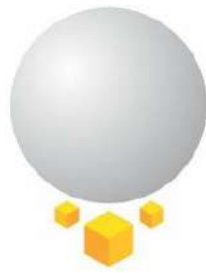


Deformação cisalhante

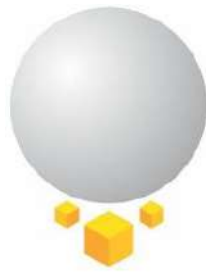




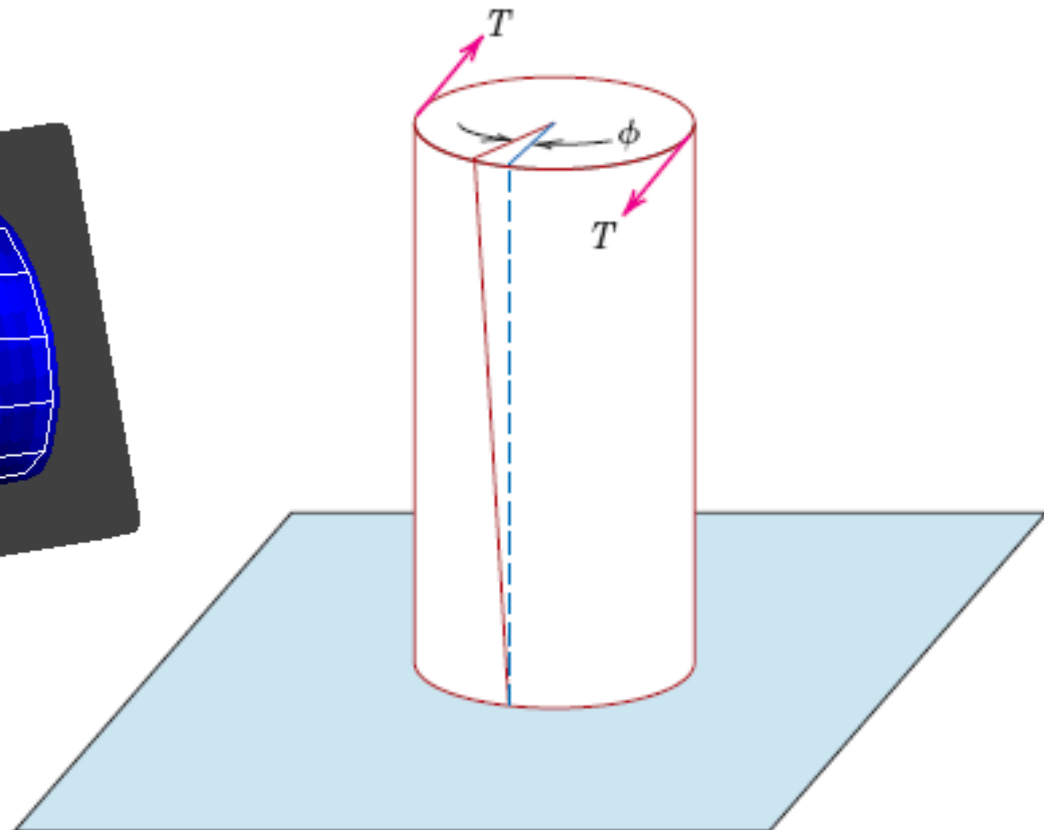
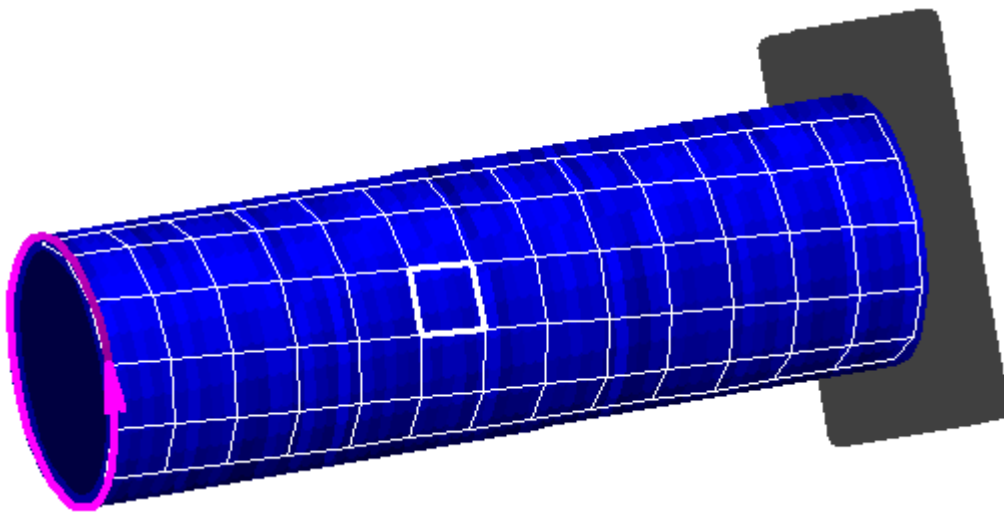
# 3. Propriedades mecânicas dos materiais



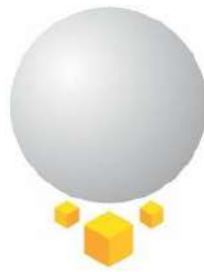
# 3.1. Conceitos de tensão e deformação



- Na prática de engenharia, porém, muitas cargas são de torção em vez de cisalhamento puro.

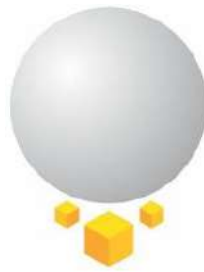


# 3. Propriedades mecânicas dos materiais



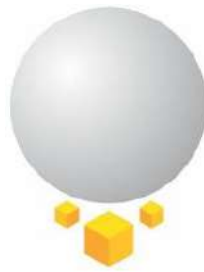
- Um dos testes mecânicos mais comuns de tensão-deformação é o ensaio de **tração simples** (ou uniaxial).
- Neste teste uma amostra é deformada, usualmente até à fratura, com carga de tração que é aplicada uniaxialmente ao longo do eixo de uma amostra.

# 3. Propriedades mecânicas dos materiais



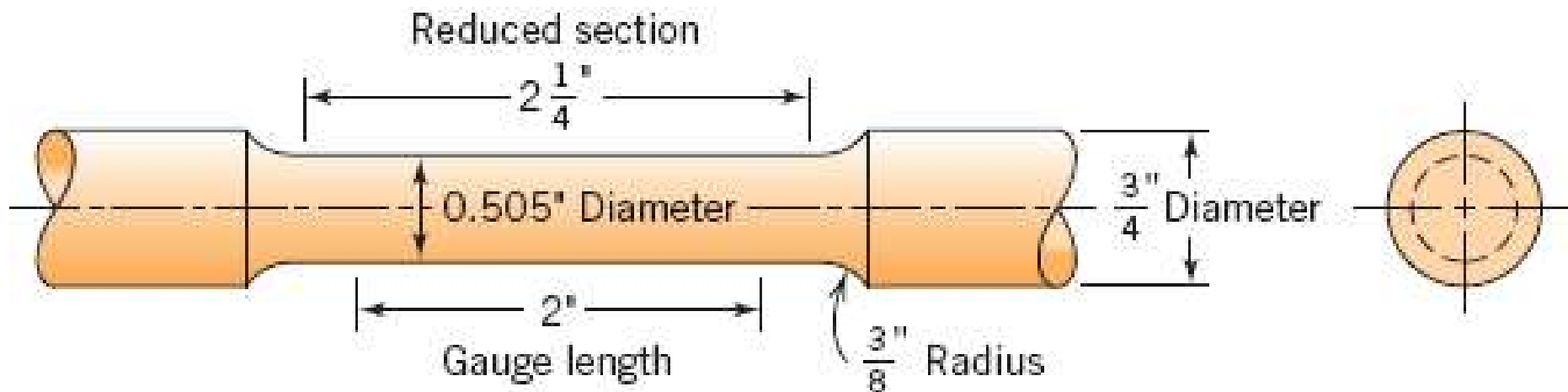
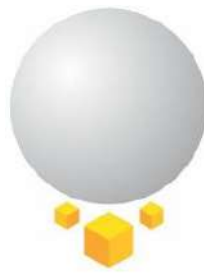
- Normalmente, a seção reta é circular, mas amostras retangulares são também usadas.
- Durante o teste, a deformação é confinada a uma estreita região central, que tem uma seção reta uniforme ao longo do seu comprimento.

# 3. Propriedades mecânicas dos materiais



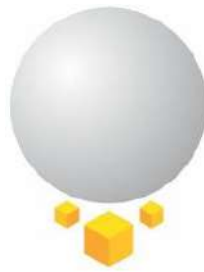
- O diâmetro padrão é aproximadamente 0,5 polegadas (12,8 mm), enquanto que o comprimento da seção reduzida deve ser pelo menos 4 vezes o diâmetro (usualmente 2,25 polegadas = 60 mm).
- A amostra é montada por suas extremidades, que são colocadas dentro das garras do aparelho de teste.

# 3. Propriedades mecânicas dos materiais



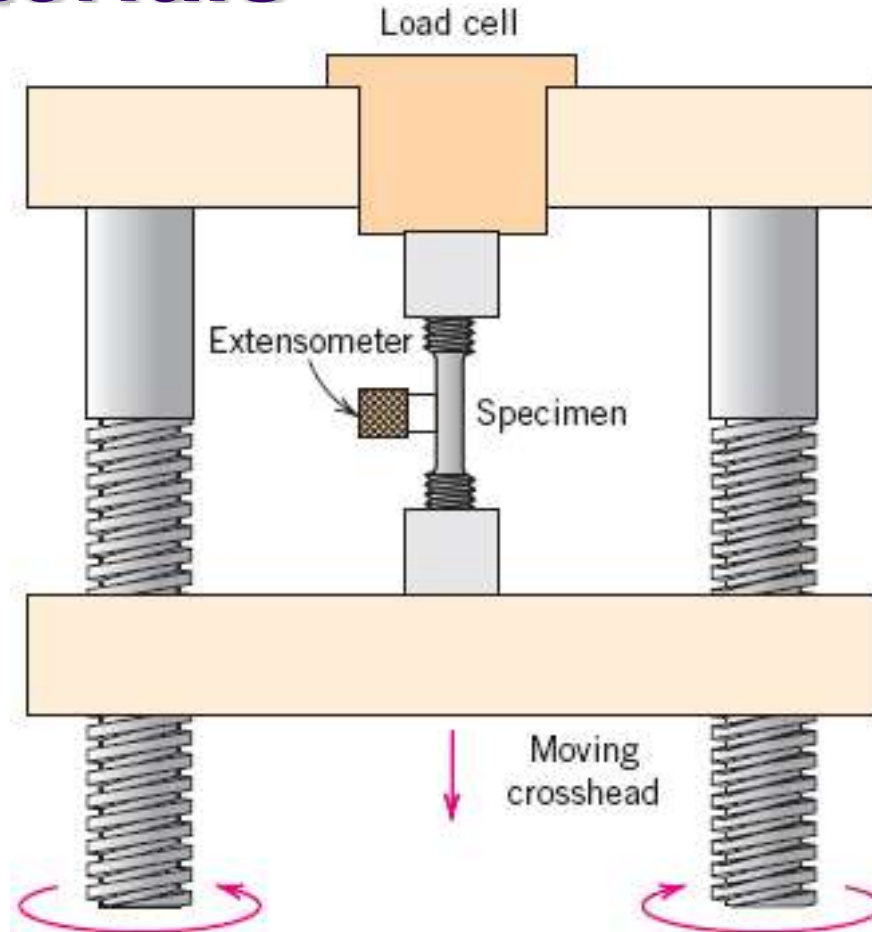
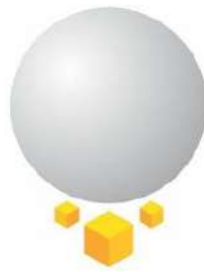
Uma amostra padrão de tração com seção reta circular.

# 3. Propriedades mecânicas dos materiais



- A máquina de teste de tração é projetada para alongar a amostra numa taxa constante e para medir continuamente e simultaneamente a carga aplicada instantânea (com uma célula de carga) e o alongamento resultante (usando um extensômetro).

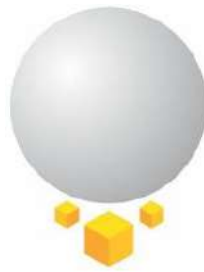
# 3. Propriedades mecânicas dos materiais



Representação esquemática do aparelho usado para conduzir testes de tensão-deformação. A amostra é alongada pelo travessão (*crosshead*) em movimento; célula de carga e extensômetro medem, respectivamente, a magnitude da carga aplicada e a alongação.



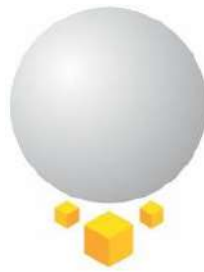
# 3. Propriedades mecânicas dos materiais



- Um teste de tensão-deformação tipicamente toma vários minutos para executar e é **destrutivo**; isto é, a amostra de teste é permanentemente deformada e usualmente fraturada.

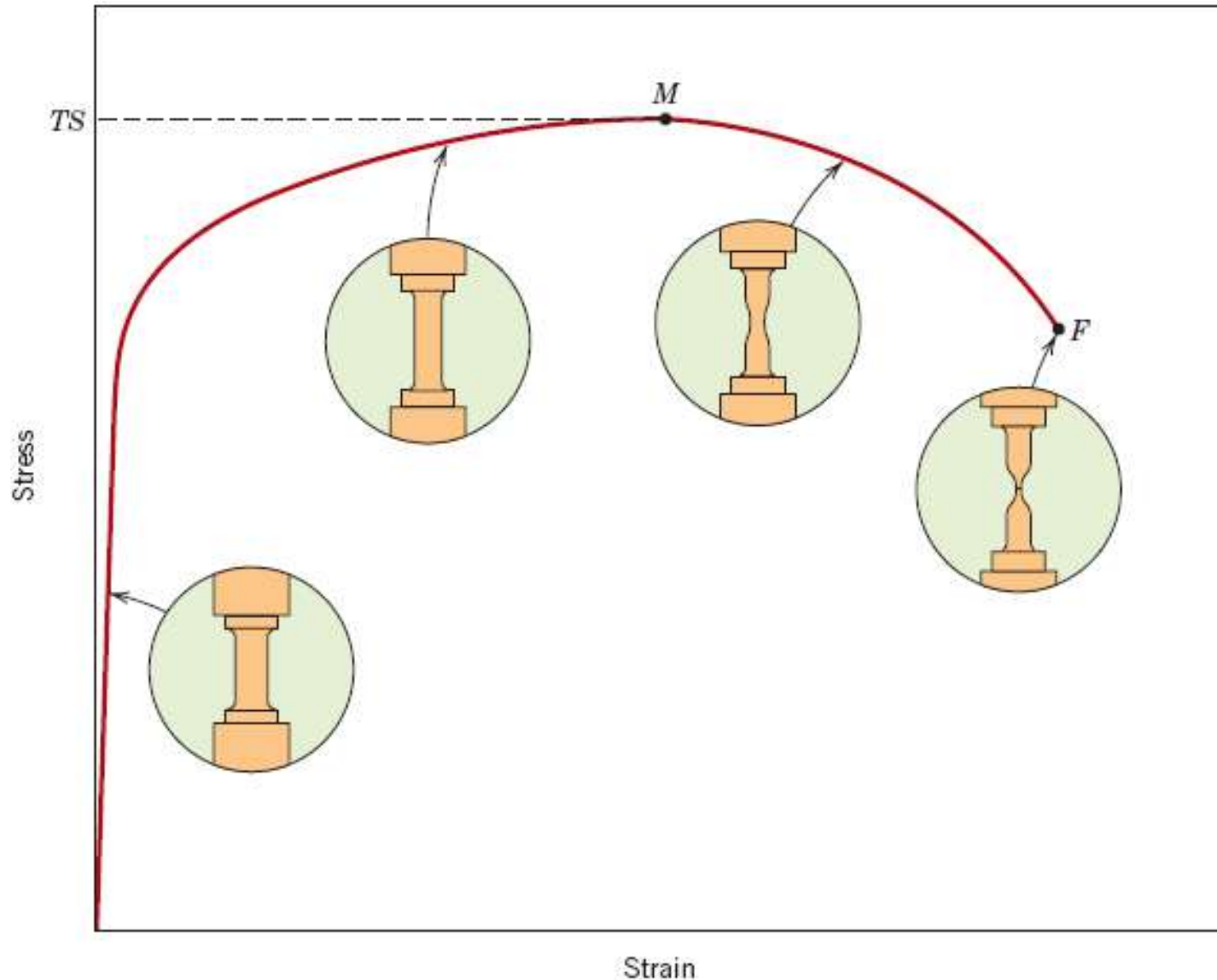
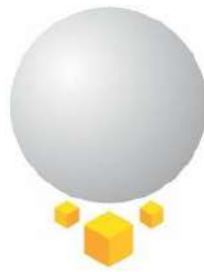


# 3. Propriedades mecânicas dos materiais

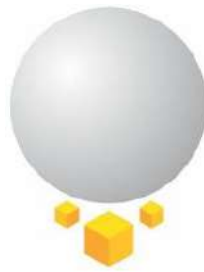


- O resultado de um teste de tração é um gráfico de carga ou força versus alongamento.
- Estas características carga-deformação são dependentes do tamanho da amostra.

# 3. Propriedades mecânicas dos materiais

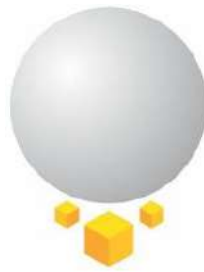


# 3. Propriedades mecânicas dos materiais



- Por exemplo, requerir-se-á duas vezes a carga para produzir o mesmo alongamento se a área da seção reta da amostra for dobrada.
- Para minimizar estes fatores geométricos, carga e alongamento são normalizadas para os respectivos parâmetros de **tensão de engenharia** e **deformação de engenharia**.

# 3. Propriedades mecânicas dos materiais

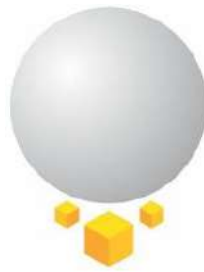


- Tensão de engenharia  $\sigma$  é definida pela correlação:

$$\sigma = F / A_0$$

- onde  $F$  é a carga instantânea aplicada perpendicularmente à seção reta da amostra, em unidade de libra-força (lbf) ou Newtons (N) e  $A_0$  é área da seção reta original antes que qualquer carga seja aplicada ( $\text{in}^2$  ou  $\text{m}^2$ ).

# 3. Propriedades mecânicas dos materiais

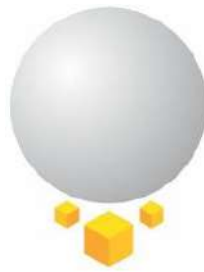


- Deformação de engenharia  $\varepsilon$  é definida de acordo com a relação:

$$\varepsilon = [(l_i - l_0) / l_0] = \Delta l / l_0$$

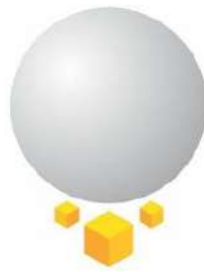
- na qual  $l_0$  é o comprimento original antes que qualquer carga seja aplicada e  $l_i$  é o comprimento instantâneo.

# 3. Propriedades mecânicas dos materiais



- A quantidade  $l_i - l_0$  é denotada como  $\Delta l$  e é o alongamento de deformação ou a mudança do comprimento em algum instante, como referenciado ao comprimento original.
- Deformação de engenharia (ou somente deformação) é adimensional, mas polegada por polegada ou metros por metro são às vezes usadas. A deformação é também expressa como uma porcentagem.

# 3. Propriedades mecânicas dos materiais

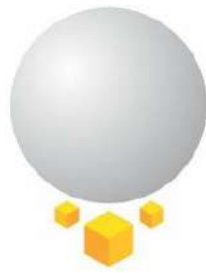


- Um teste de compressão é conduzido de maneira similar àquela de um teste de tração, exceto que a força é compressiva e a amostra se contrai ao longo da direção da tensão.





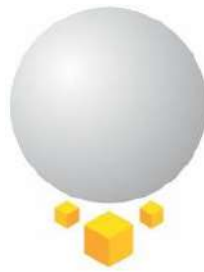
# 3. Propriedades mecânicas dos materiais



- Testes compressão podem ser conduzidos se as forças em serviço forem deste tipo.

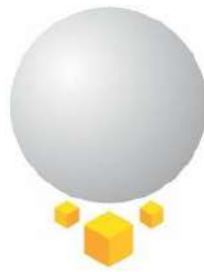


# 3. Propriedades mecânicas dos materiais



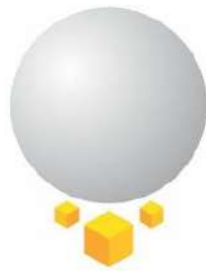
- As equações anteriores são usadas para calcular tensão e deformação, respectivamente.
- Por convenção, uma força compressiva é tomada como negativa, o que fornece uma tensão negativa.

# 3. Propriedades mecânicas dos materiais



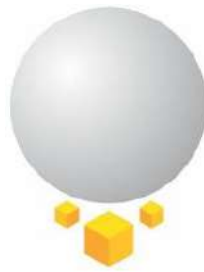
- Além disso, uma vez que  $l_0$  é maior do que  $l_i$ , deformações compressivas são necessariamente também negativas.
- Testes de compressão são comuns, porque são mais fáceis de executar.

# 3. Propriedades mecânicas dos materiais



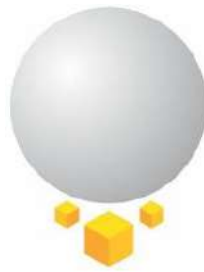
Ensaio de compressão de corpo de prova cilíndrico  
Prensa AMSLER capacidade de 200 ton

# 3. Propriedades mecânicas dos materiais



- O grau até onde uma estrutura se deforma ou se escoia depende da magnitude de uma tensão imposta.
- Para muitos metais que são tracionados em níveis relativamente baixos, tensão e deformação são proporcionais entre si através da correlação:

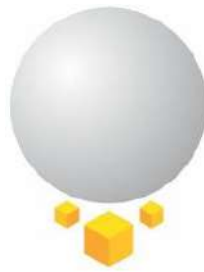
# 3. Propriedades mecânicas dos materiais



$$\sigma = E \varepsilon$$

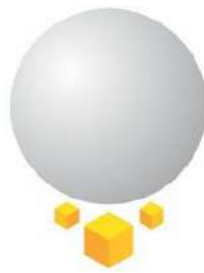
- Esta é conhecida como a lei de Hooke e a constante de proporcionalidade  $E$  (dada em psi ou MPa) é o **módulo de elasticidade** ou **módulo de Young**.

# 3. Propriedades mecânicas dos materiais



- Para muitos metais típicos a magnitude deste módulo varia entre  $4,5 \times 10^4$  MPa ( $6,5 \times 10^6$  psi) para o magnésio, e  $40,7 \times 10^4$  MPa ( $59 \times 10^6$  psi) para o tungstênio.
- Valores de módulo de elasticidade para vários metais à temperatura ambiente são apresentados na tabela abaixo.

# 3. Propriedades mecânicas dos materiais

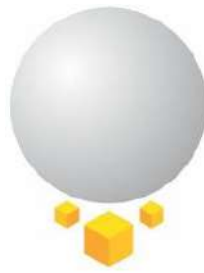


<i>Metal Alloy</i>	<i>Modulus of Elasticity</i>		<i>Shear Modulus</i>		<i>Poisson's Ratio</i>
	<i>GPa</i>	<i>10<sup>6</sup> psi</i>	<i>GPa</i>	<i>10<sup>6</sup> psi</i>	
Aluminum	69	10	25	3.6	0.33
Brass	97	14	37	5.4	0.34
Copper	110	16	46	6.7	0.34
Magnesium	45	6.5	17	2.5	0.29
Nickel	207	30	76	11.0	0.31
Steel	207	30	83	12.0	0.30
Titanium	107	15.5	45	6.5	0.34
Tungsten	407	59	160	23.2	0.28

Módulos de elasticidade e cisalhamento à temperatura ambiente e razão de Poisson para várias ligas metálicas.

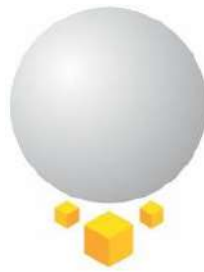


# 3. Propriedades mecânicas dos materiais



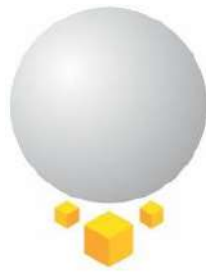
- A deformação na qual a tensão e a deformação são linearmente proporcionais é chamada **deformação elástica**; um gráfico de tensão (ordenada) versus deformação (abscissa) resulta numa correlação linear.
- A inclinação deste segmento linear corresponde ao módulo de elasticidade  $E$ .

# 3. Propriedades mecânicas dos materiais



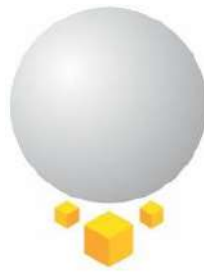
- Este módulo pode ser pensado como a rigidez ou uma resistência do material à deformação elástica.
- Quanto maior o módulo, tanto mais rígido é o material, ou menor é a deformação elástica que resulta da aplicação de uma dada tensão.

# 3. Propriedades mecânicas dos materiais



- O módulo de elasticidade é um importante parâmetro de projeto usado para calcular flexões elásticas.
- A deformação elástica não é permanente, o que significa que quando a carga aplicada for aliviada, a peça retornará à sua forma original.

# 3. Propriedades mecânicas dos materiais



- Como mostrado no gráfico de tensão-deformação, a aplicação da carga corresponde a mover-se a partir da origem para cima e ao longo da linha reta.
- Ao se aliviar a carga, a linha é atravessada no sentido oposto, de volta à origem.

# 3. Propriedades mecânicas dos materiais

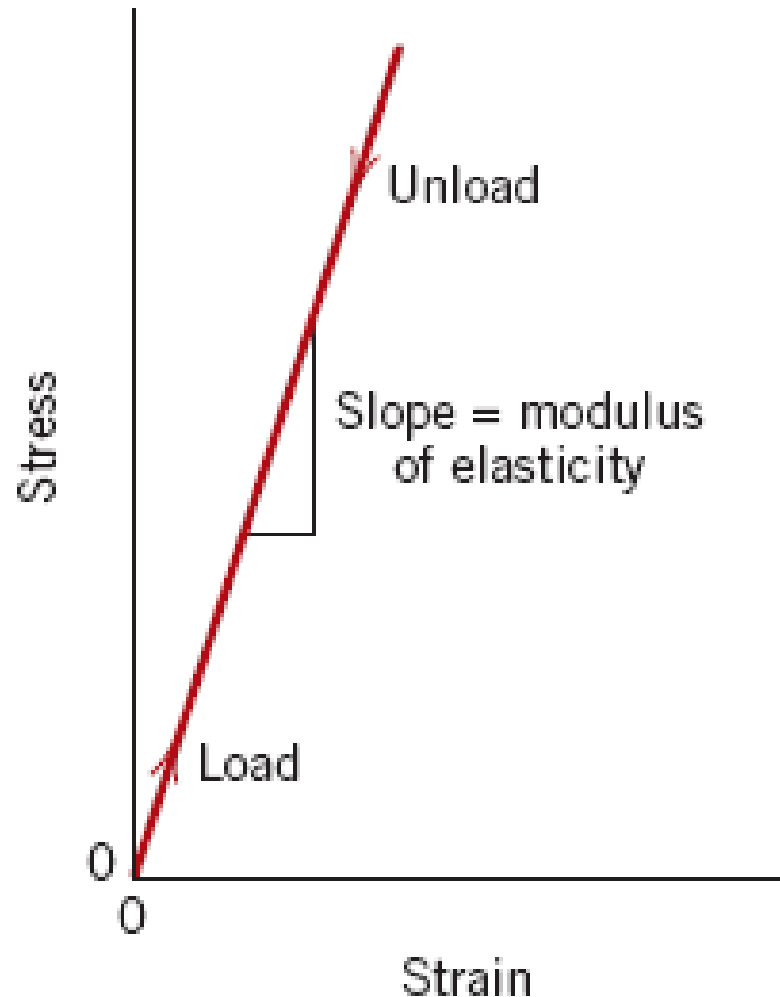
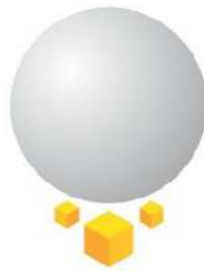
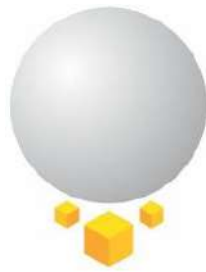


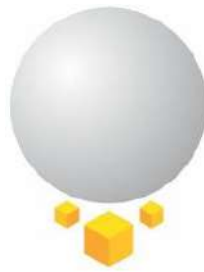
Diagrama esquemático tensão-deformação mostrando uma deformação elástica para ciclos de carregamento e descarregamento.

# 3. Propriedades mecânicas dos materiais



- Existem alguns materiais (como por exemplo o ferro fundido cinzento e o concreto) para os quais esta porção inicial elástica da curva de tensão-deformação não é linear e, portanto, não é possível determinar um módulo de elasticidade como descrito anteriormente.

# 3. Propriedades mecânicas dos materiais



- Para este comportamento não-linear, tanto o **módulo tangente** quanto o **módulo secante** são normalmente usados.
- O módulo tangente é tomado como a inclinação da curva de tensão-deformação em um nível de tensão especificado, enquanto que o módulo secante representa a inclinação de uma secante traçada a partir da origem até algum dado ponto da curva  $\sigma$ - $\epsilon$ .

# 3. Propriedades mecânicas dos materiais

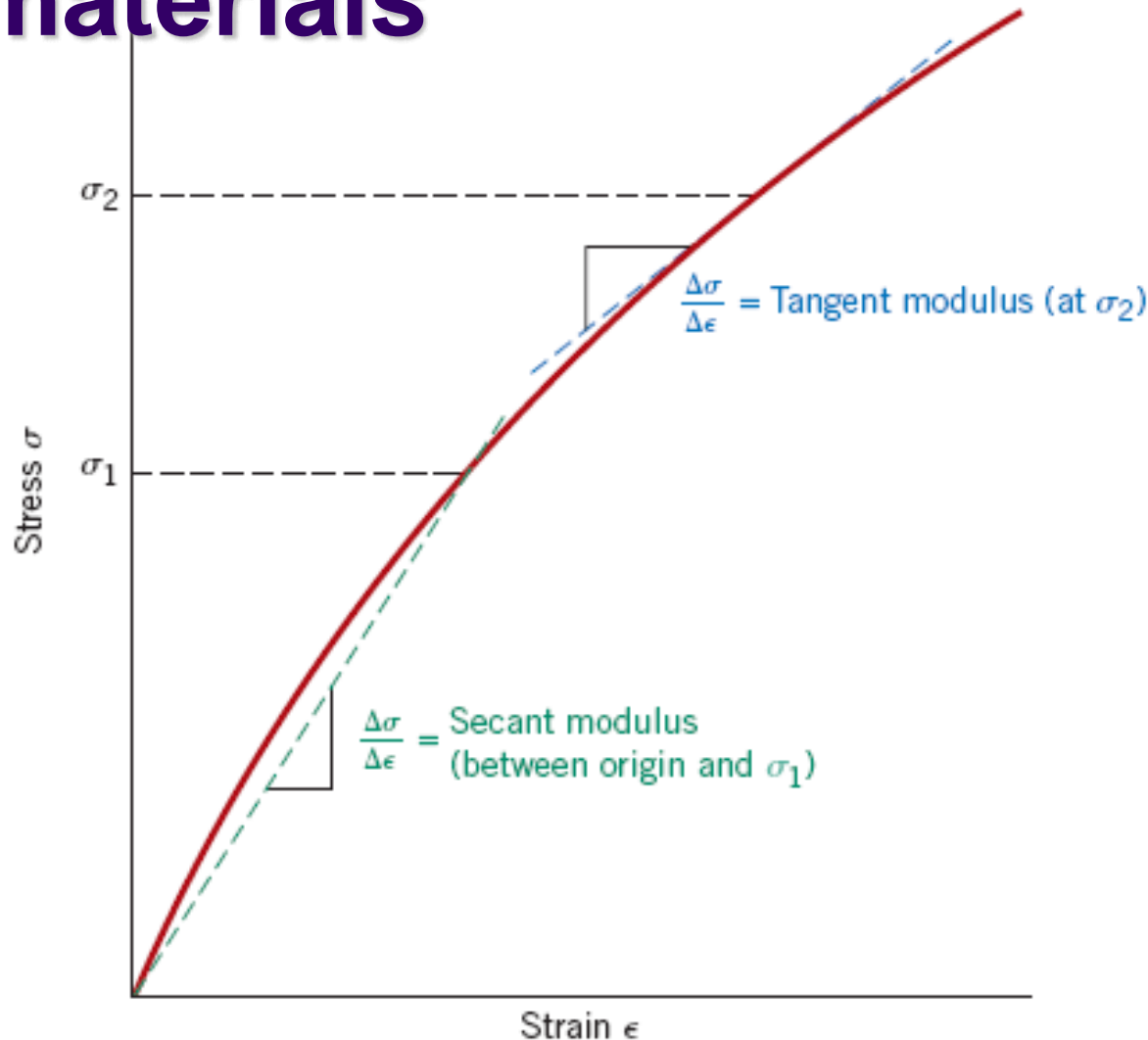
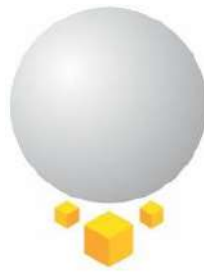
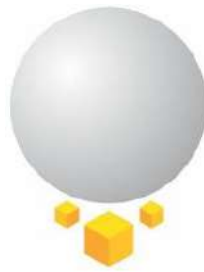


Diagrama esquemático tensão-deformação mostrando comportamento elástico não-linear e como os módulos secante e tangente são determinados.

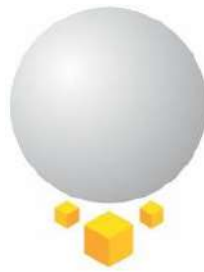


# 3. Propriedades mecânicas dos materiais



- Os valores do módulo de elasticidade para materiais cerâmicos são caracteristicamente maiores do que aqueles para metais e para polímeros são menores ainda.
- Estas diferenças são uma consequência direta dos diferentes tipos de ligação atômica nos três tipos de materiais.

# 3. Propriedades mecânicas dos materiais



- Além disso, com o aumento da temperatura, o módulo de elasticidade decresce, tal como é mostrado na figura abaixo para vários metais.

# 3. Propriedades mecânicas dos materiais

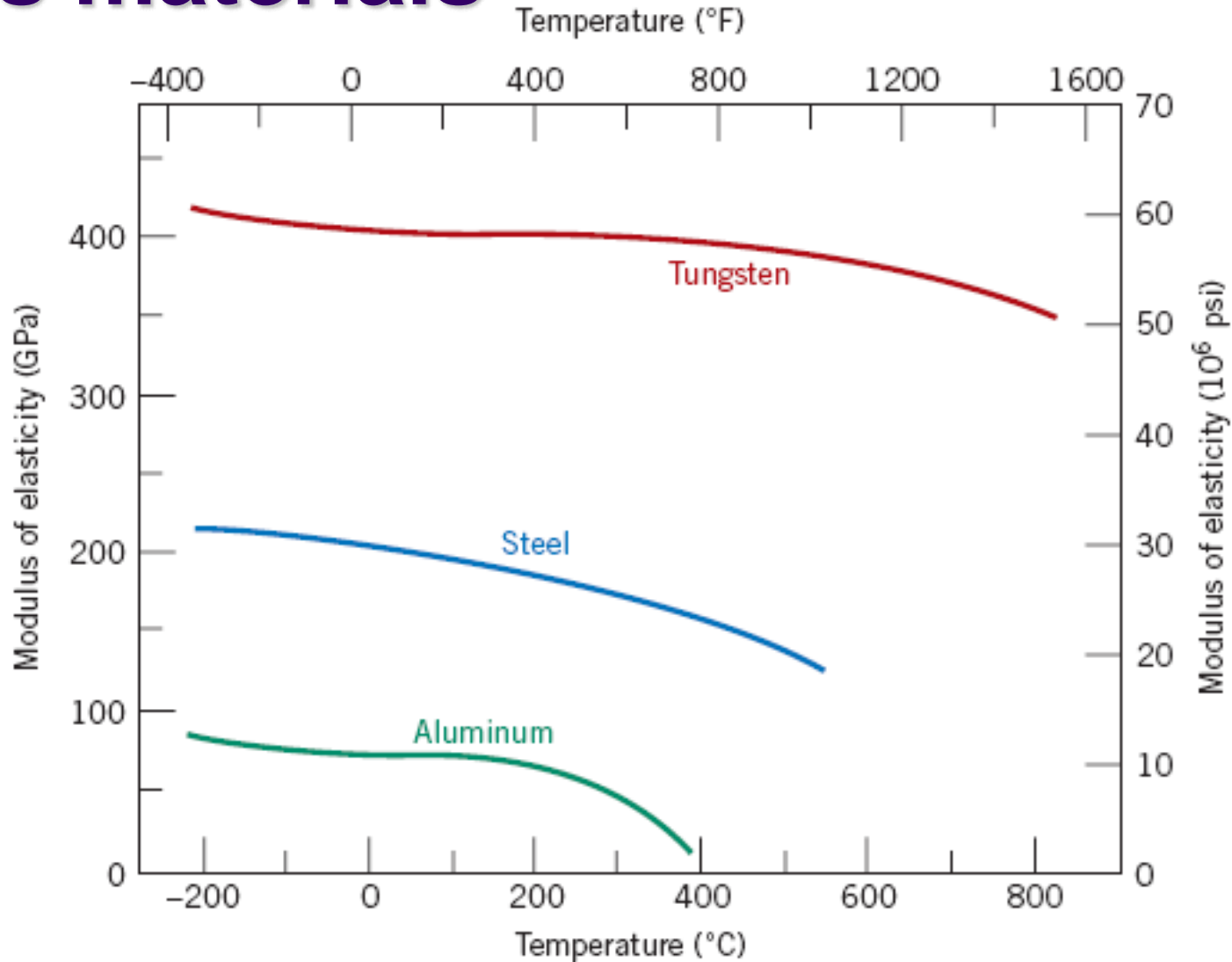
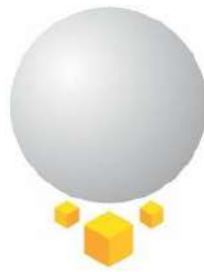
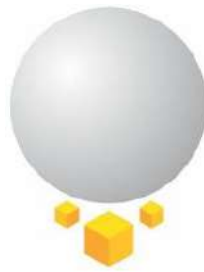


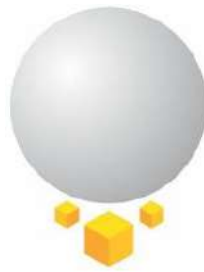
Gráfico de módulo de elasticidade versus temperatura para tungstênio, aço e alumínio.

# 3. Propriedades mecânicas dos materiais



- Como era esperado, a imposição de tensões compressiva, cisalhante ou de torção também provocam comportamento elástico.
- As características de tensão-deformação em baixos níveis de tensão são virtualmente as mesmas para as situações tanto de tração quanto de compressão, para incluir a magnitude do módulo de elasticidade.

# 3. Propriedades mecânicas dos materiais

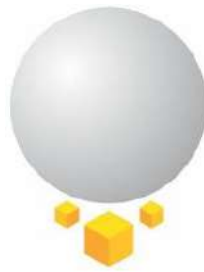


- Tensão cisalhante e deformação cisalhante são proporcionais entre si através da expressão:

$$\tau = G\gamma$$

- onde  $G$  é o **módulo cisalhante**, que é a inclinação da região elástica linear da curva de tensão cisalhante-deformação.

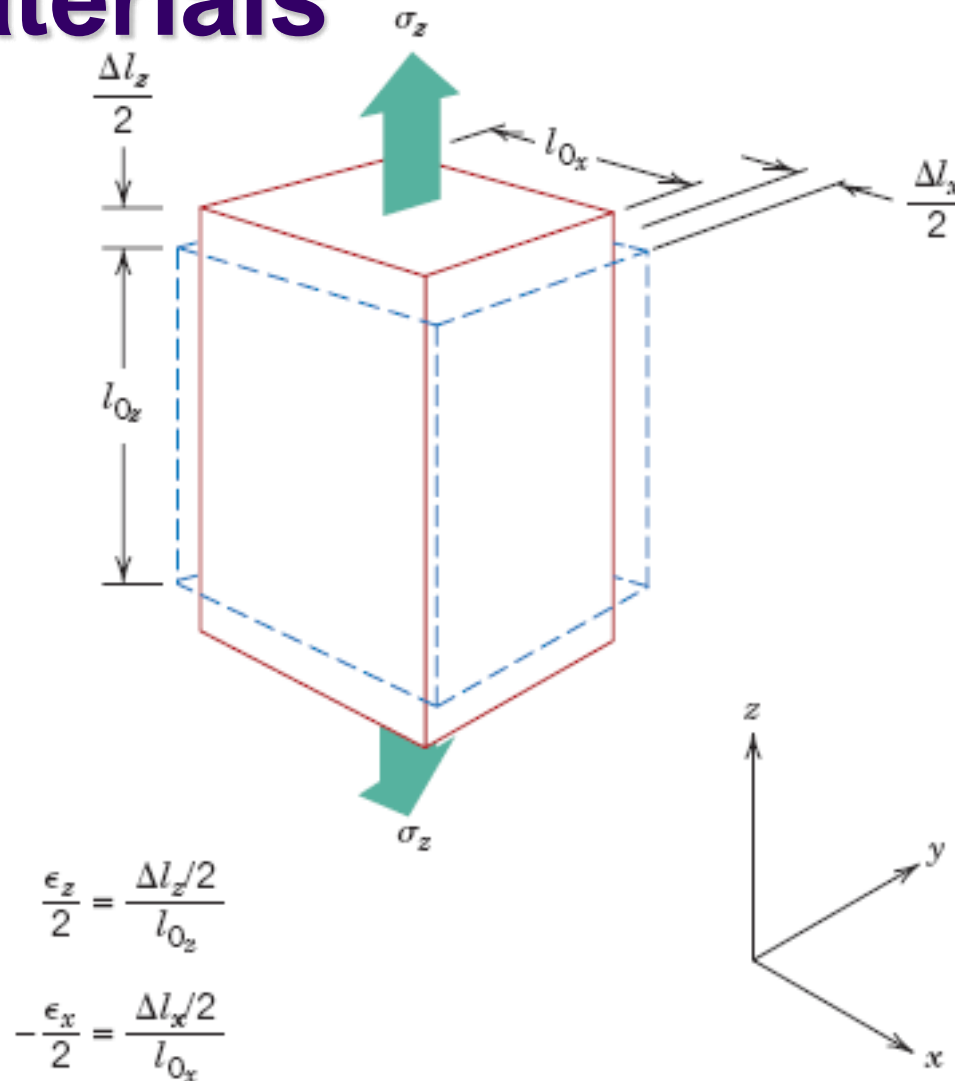
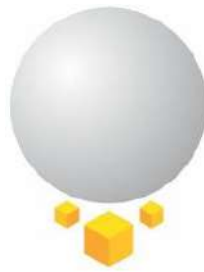
# 3. Propriedades mecânicas dos materiais



- Um parâmetro denominado **razão de Poisson**  $\nu$  é definido como a razão entre as deformações lateral e axial, ou:

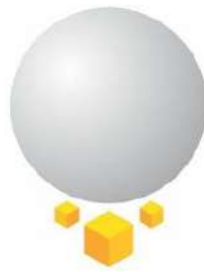
$$\nu = -\varepsilon_x / \varepsilon_z = -\varepsilon_y / \varepsilon_z$$

# 3. Propriedades mecânicas dos materiais



Elongação axial (z) (deformação positiva) e contração lateral (x e y) (deformações negativas) em resposta a uma tensão de tração imposta.

# 3. Propriedades mecânicas dos materiais



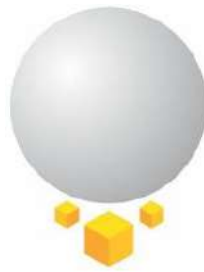
- Os módulos cisalhante e elástico estão relacionados entre si e à razão de Poisson de acordo com a equação:

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

- Em muitos metais  $G$  é cerca de  $0,4E$ ; assim, se o valor de um módulo for conhecido, o outro pode ser aproximado.

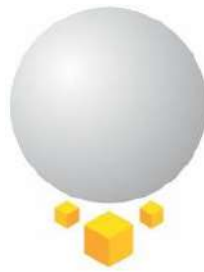


# 3. Propriedades mecânicas dos materiais



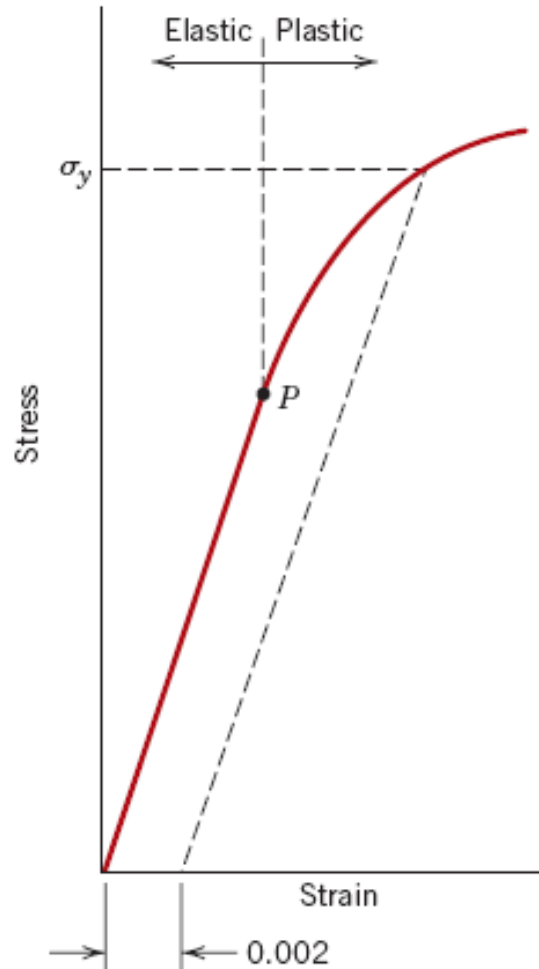
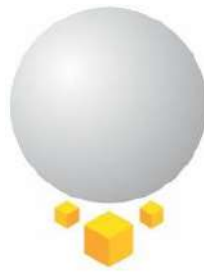
- Para muitos materiais metálicos, a deformação elástica persiste apenas para deformações de cerca de 0,005.
- À medida em que o material é deformado além deste ponto, a tensão não é mais proporcional à deformação (a lei de Hooke deixa de ser válida) e ocorre deformação permanente, não-recuperável, denominada ***deformação plástica***.

# 3. Propriedades mecânicas dos materiais



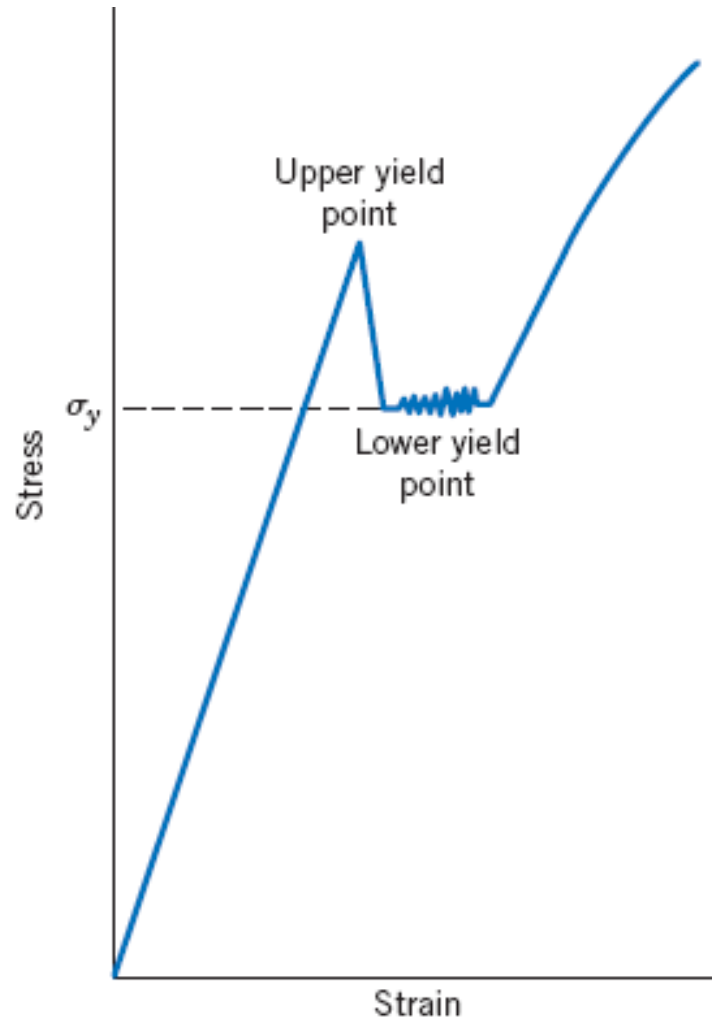
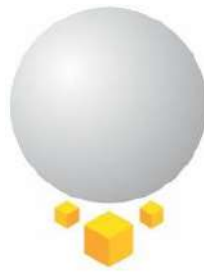
- A figura a seguir mostra esquematicamente o comportamento tensão de tração-deformação na região plástica para um metal típico.
- A transição a partir de elástico para plástico é uma transição gradual para muitos metais; alguma curvatura resulta no ponto de início de deformação plástica, que cresce mais rapidamente com a elevação da tensão.

# 3. Propriedades mecânicas dos materiais

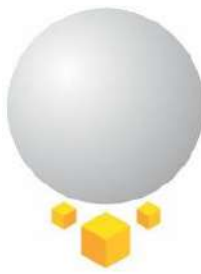


Comportamento típico tensão-deformação para um metal mostrando deformações elástica e plástica, o limite proporcional  $P$  e o limite de elasticidade convencional  $\sigma_y$  determinado usando o método de desvio com deformação 0,002.

# 3. Propriedades mecânicas dos materiais

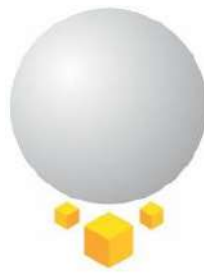


Comportamento representativo tensão-deformação encontrado para alguns aços demonstrando o fenômeno do limite superior do escoamento.



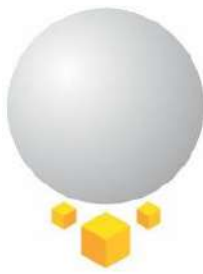
## 3.1. Ductilidade

- ***Ductilidade*** é outra importante propriedade mecânica.
- Ela é uma medida do grau de deformação plástica que foi sustentada na fratura.

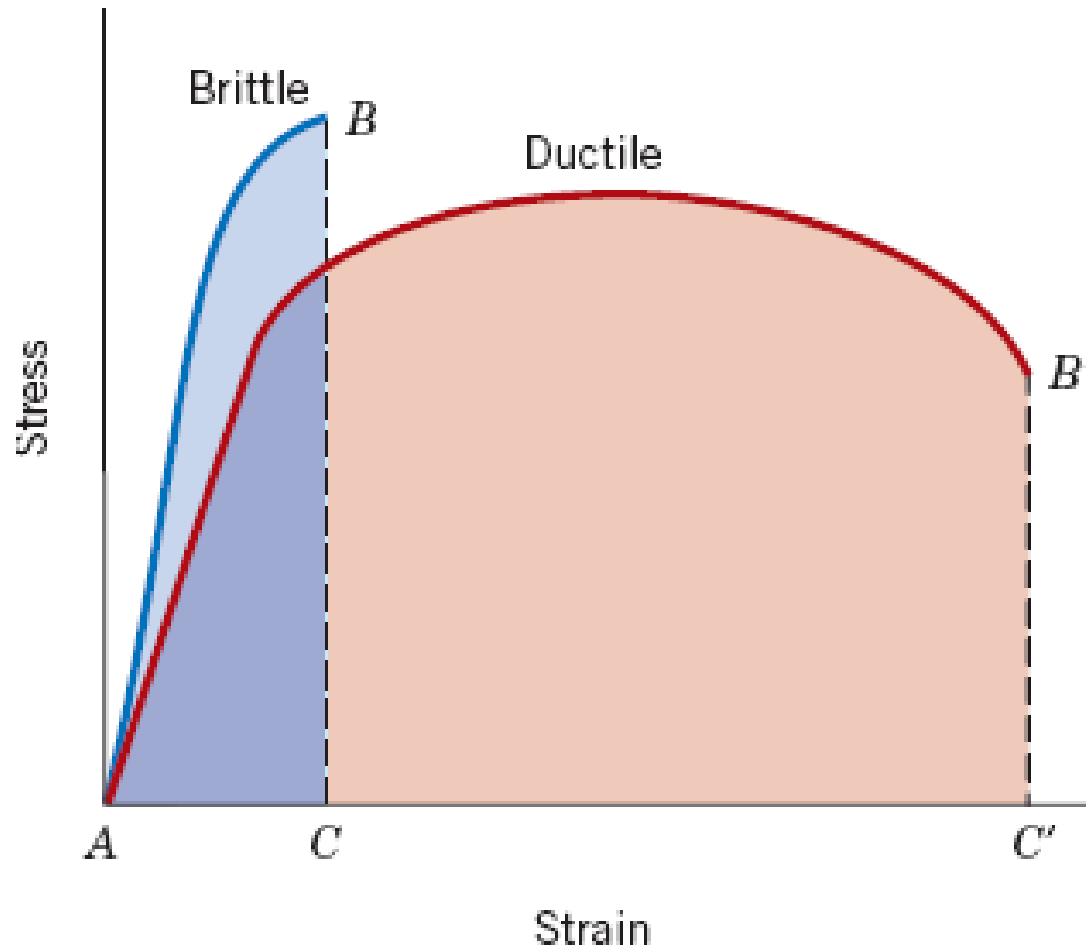


## 3.1. Ductilidade

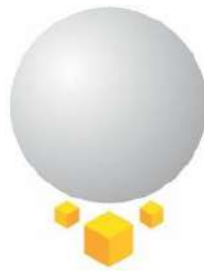
- Um material que experimenta muito pouca, ou nenhuma, deformação plástica antes da fratura é denominado **frágil** (*brittle*).
- Os comportamentos de tensão de tração-deformação para materiais tanto dúcteis quanto frágeis são esquematicamente ilustrados na figura a seguir.



# 3.1. Ductilidade



Representações esquemáticas de comportamento tensão de tração-deformação para materiais frágeis e dúcteis carregados até à fratura.



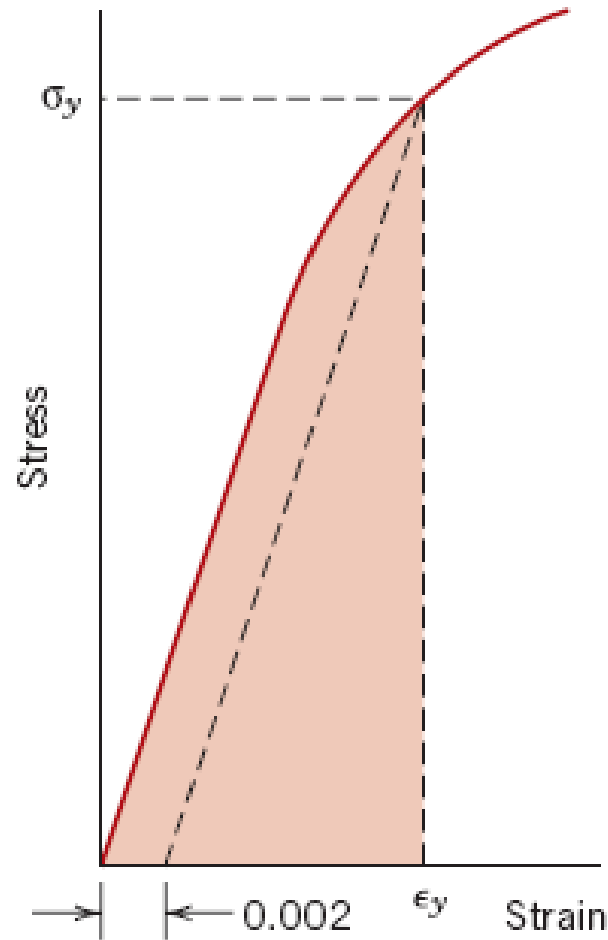
## 3.2. Resiliência

- **Resiliência** é a capacidade de um material absorver energia quando ele é deformado elasticamente e então, no descarregamento, ter esta energia recuperada.
- A propriedade associada é o *módulo de resiliência*,  $U_r$ , que é a energia de deformação por unidade de volume requerida para tencionar o material a partir do estado não-carregado até o ponto de escoamento.



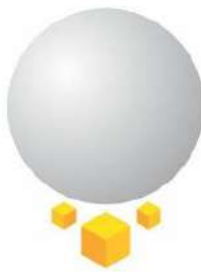


## 3.2. Resiliência



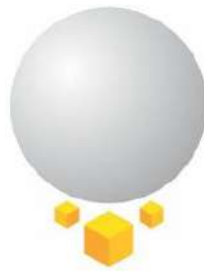
$$U_r = \int_0^{\epsilon_y} \sigma dE$$

Representação esquemática mostrando como o módulo de resiliência (correspondendo à área sombreada) é determinado a partir do comportamento de tensão de tração-deformação do material.



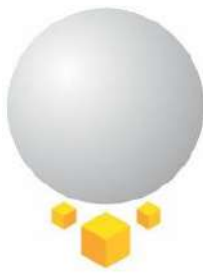
## 3.3. Tenacidade

- **Tenacidade** é um termo mecânico que é usado em vários contextos.
- Falando de uma maneira liberal, é uma medida da capacidade de um material para absorver energia até a fratura.



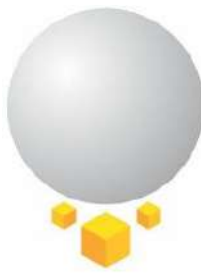
## 3.3. Tenacidade

- A geometria da amostra bem como a maneira de aplicação da carga são importantes nas determinações de tenacidade.
- Para condições de carregamento dinâmico (alta taxa de deformação) e quando um entalhe (ou ponto de concentração de tensão) estiver presente, **tenacidade de entalhe** é acessada pelo uso de um teste de impacto.



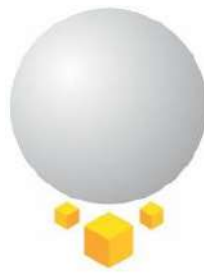
## 3.3. Tenacidade

- Além disso, tenacidade à fratura é uma propriedade indicativa da resistência do material à fratura quando uma trinca estiver presente.



## 3.4. Dureza

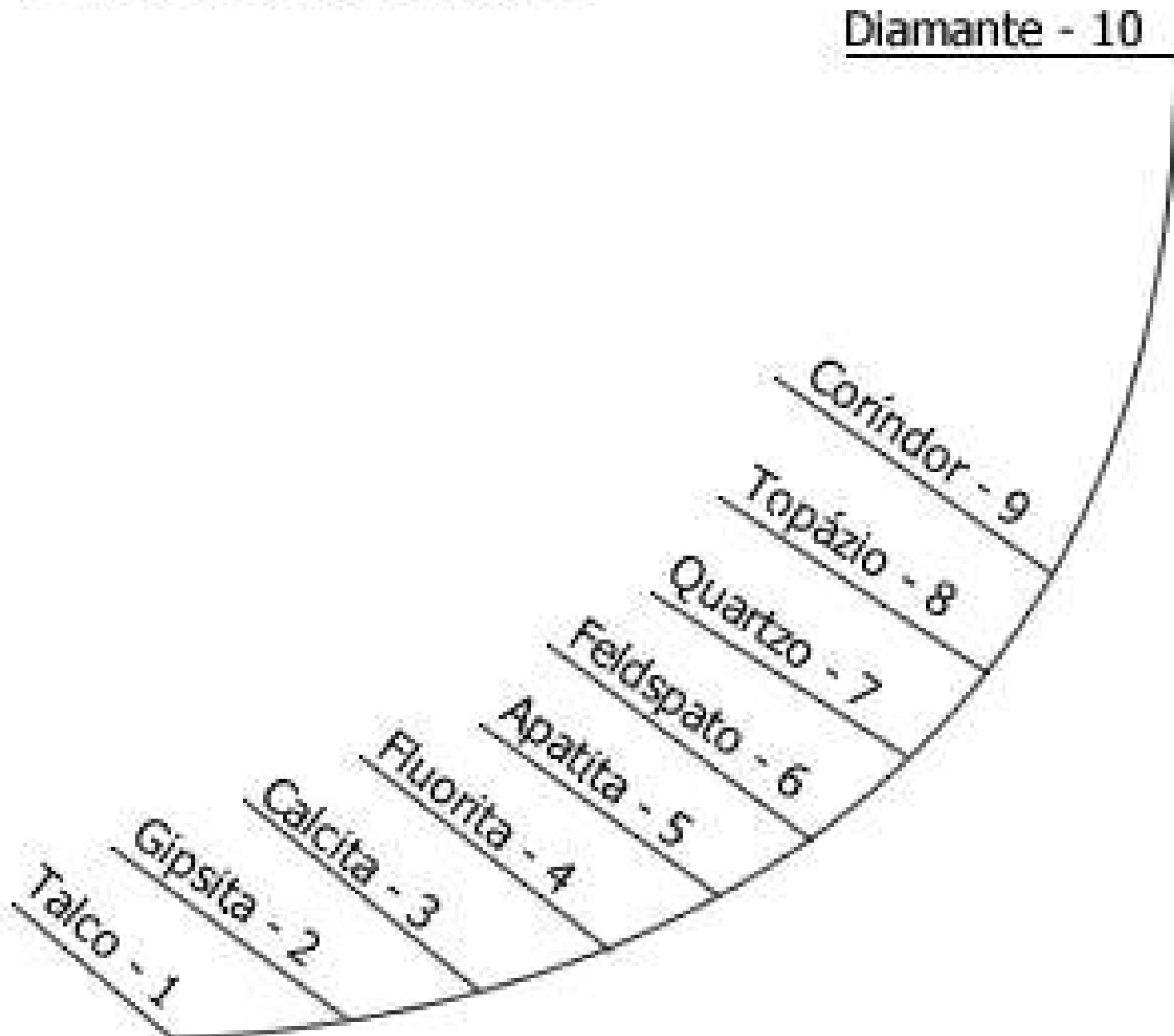
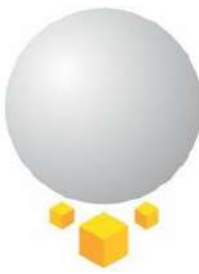
- Uma outra propriedade mecânica importante que pode ser importante considerar é a ***dureza***, que é uma medida da resistência de um material à deformação plástica local (por exemplo, um pequeno dente ou um risco).

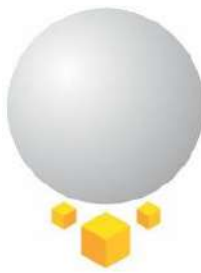


## 3.4. Dureza

- Os primeiros testes de dureza eram baseados em minerais naturais com uma escala construída somente com base na capacidade de um material riscar um outro que é mais macio.
- Um esquema de indexação de dureza qualitativo e um tanto arbitrário foi denominado de escala de Mohs, que varia desde 1 na extremidade macia para o talco até 10 para o diamante.

# Escala de Mohs





## 3.4. Dureza

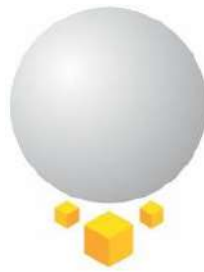
Dureza	Mineral	Fórmula química
1	Talco, (pode ser arranhado facilmente com a unha)	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$
2	Gipsita (ou Gesso), (pode ser arranhado com unha com um pouco mais de dificuldade)	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$
3	Calcita, (pode ser arranhado com uma moeda de cobre)	$CaCO_3$
4	Fluorita, (pode ser arranhada com uma faca de cozinha)	$CaF_2$
5	Apatita, (pode ser arranhada dificilmente com uma faca de cozinha)	$Ca_5(PO_4)_3(OH, Cl, F)$
6	Feldspato / Ortoclásio, (pode ser arranhado com uma liga de aço)	$KAlSi_3O_8$
7	Quartzo, (capaz de arranhar o vidro. Ex.: Ametista)	$SiO_2$
8	Topázio, (a Esmeralda também possui esta dureza)	$Al_2SiO_4(OH, F)_2$
9	Corindon, (safira e rubi são formas de corindon)	$Al_2O_3$
10	Diamante, (é o mineral natural mais duro)	C





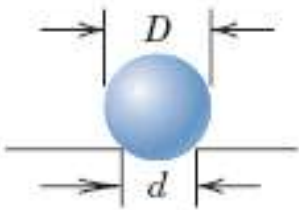
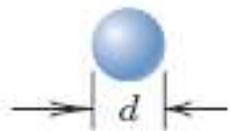
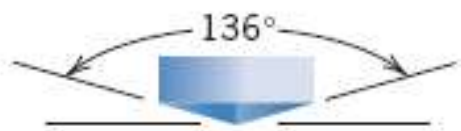

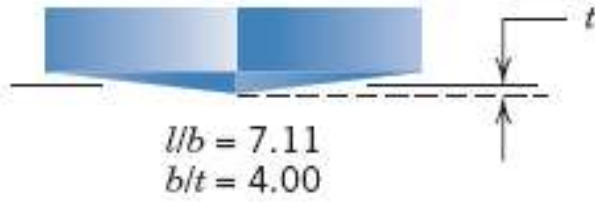
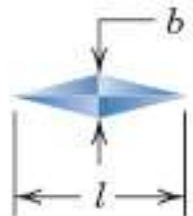
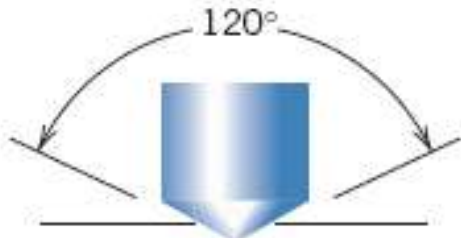



## 3.4. Dureza

- Ao longo dos anos foram desenvolvidas técnicas de dureza quantitativas nas quais um pequeno objeto é forçado para dentro da superfície de um material a ser testado, sob condições controladas de carga e de taxa de aplicação.

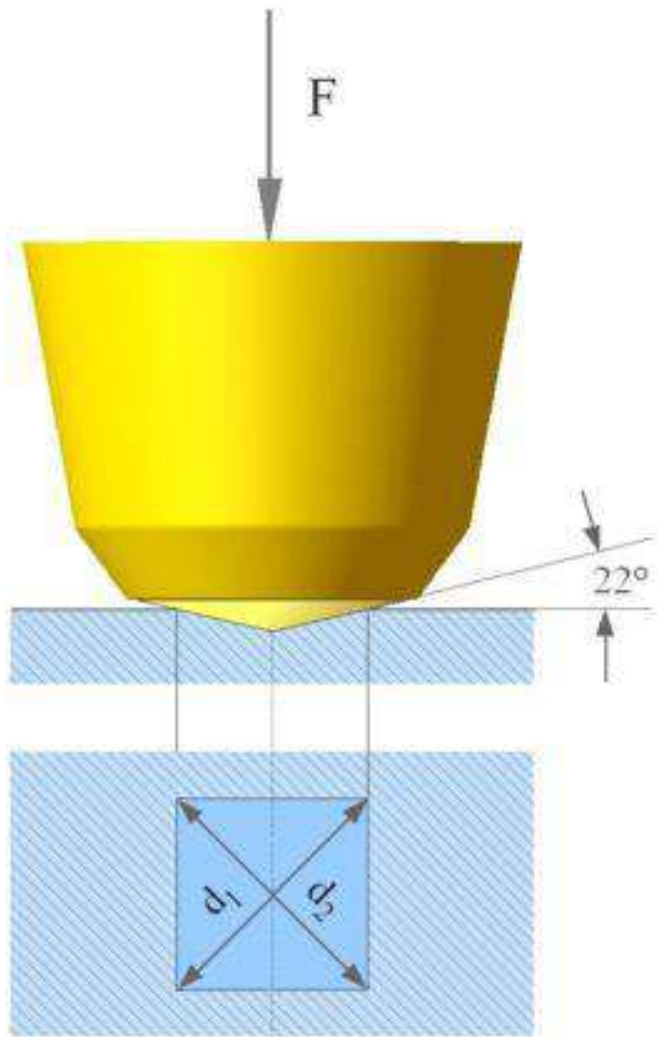


## 3.4. Dureza

- É medida a profundidade ou o tamanho da resultante endentação que por sua vez é relacionada ao número de dureza, quanto mais macio o material, tanto maior e mais profunda a endentação e tanto menor o número índice de dureza.
- Durezas medidas são apenas relativas (em vez de absolutas) e deve-se tomar cuidado ao se comparar valores determinados por técnicas diferentes.

<i>Test</i>	<i>Indenter</i>	<i>Shape of Indentation</i>	
		<i>Side View</i>	<i>Top View</i>
Brinell	10-mm sphere of steel or tungsten carbide		
Vickers microhardness	Diamond pyramid		
Knoop microhardness	Diamond pyramid		
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</li> <li>steel spheres</li> </ul>	  	  

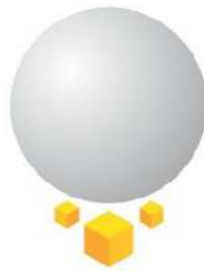
# 3. Propriedades mecânicas dos materiais



Escala de Mohs	Dureza Vickers (kgf/mm <sup>2</sup> )
1,00	5,00
2,0	80,00
3,0	130,0
4,0	200,0
5,0	320,0
6,0	500,00
7,0	800,00
8,0	1300,00
9,0	2000,00
10,0	10000,00

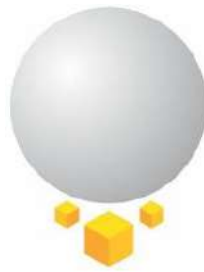
Dureza Vickers

# 4. Propriedades térmicas dos materiais

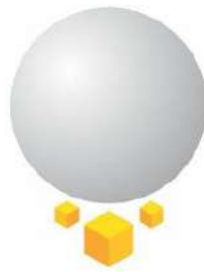


- Por ***propriedade térmica*** entende-se a resposta de um material à aplicação de calor.
- À medida que um sólido absorve energia na forma de calor, sua temperatura sobe e suas dimensões aumentam (*dilatação térmica*).

# 4. Propriedades térmicas dos materiais

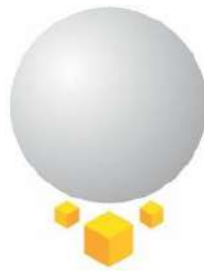


- A energia pode ser transportada para regiões mais frias da amostra se existirem gradientes de temperatura e, finalmente, a amostra pode se fundir.
- Capacidade calorífica, expansão térmica e condutibilidade térmica são propriedades que são às vezes críticas na utilização prática de sólidos.



## 4.1. Capacidade calorífica

- Um material sólido, quando aquecido, experimenta um aumento de temperatura significando que alguma energia foi absorvida. A **capacidade calorífica** é uma propriedade que é indicativa da capacidade de um material para absorver calor a partir das circunvizinhanças externas e representa a quantidade de energia requerida para produzir uma elevação unitária de temperatura.



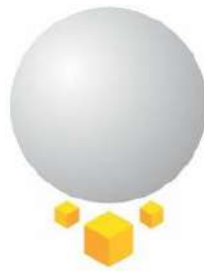
## 4.1. Capacidade calorífica

- Em termos matemáticos, a capacidade calorífica  $C$  é expressa como se segue:

$$C = dQ / dT$$

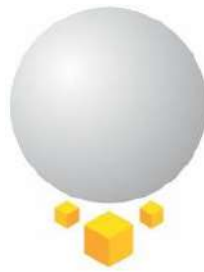
- Onde  $dQ$  é a energia requerida para produzir uma elevação de temperatura  $dT$ .





## 4.1. Capacidade calorífica

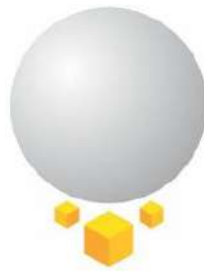
- Ordinariamente, a capacidade calorífica é especificada por mol de material (por exemplo,  $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , ou  $\text{cal}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ).
- **Calor específico** (às vezes denotado por uma letra minúscula **c**) é às vezes usado, sendo que este representa a capacidade calorífica por unidade de massa ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ,  $\text{cal}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ,  $\text{Btu}\cdot\text{Lbm}^{-1}\cdot^{\circ}\text{F}^{-1}$ ).



## 4.2. Expansão térmica

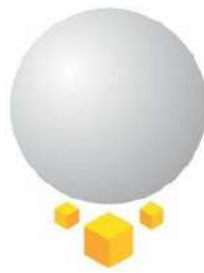
- A maioria dos materiais sólidos se expandem no aquecimento e se contraem no resfriamento.
- A mudança no comprimento de um material sólido com a temperatura pode ser expressa da seguinte maneira:

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \alpha_l \Delta T$$



## 4.2. Expansão térmica

- Onde  $l_0$  e  $l_f$  representam, respectivamente, comprimentos inicial e final com a mudança de temperatura a partir de  $T_0$  a  $T_f$ .
- O parâmetro  $\alpha_l$  é denominado **coeficiente linear de expansão térmica** e é uma propriedade do material que indica a extensão na qual um material se expande no aquecimento e tem unidades de recíproco da temperatura [ $(^\circ\text{C})^{-1}$  ou  $(^\circ\text{F})^{-1}$ ].



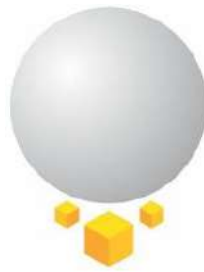
## 4.2. Expansão térmica

- Naturalmente, aquecimento ou resfriamento afetam todas as dimensões de um corpo, com a resultante mudança no volume.
- Variações de volume com a temperatura podem ser calculadas a partir da relação:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \alpha_v \Delta T$$

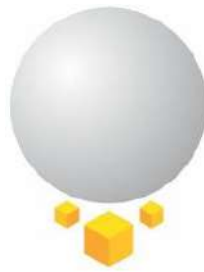
<i>Material</i>	$c_p$ (J/kg-K) <sup>a</sup>	$\alpha_l$ [(°C) <sup>-1</sup> × 10 <sup>-6</sup> ] <sup>b</sup>	$k$ (W/m-K) <sup>c</sup>	$L$ [Ω-W/(K) <sup>2</sup> × 10 <sup>-8</sup> ]
<b>Metals</b>				
Aluminum	900	23.6	247	2.20
Copper	386	17.0	398	2.25
Gold	128	14.2	315	2.50
Iron	448	11.8	80	2.71
Nickel	443	13.3	90	2.08
Silver	235	19.7	428	2.13
Tungsten	138	4.5	178	3.20
1025 Steel	486	12.0	51.9	—
316 Stainless steel	502	16.0	15.9	—
Brass (70Cu–30Zn)	375	20.0	120	—
Kovar (54Fe–29Ni–17Co)	460	5.1	17	2.80
Invar (64Fe–36Ni)	500	1.6	10	2.75
Super Invar (63Fe–32Ni–5Co)	500	0.72	10	2.68
<b>Ceramics</b>				
Alumina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	775	7.6	39	—
Magnesia (MgO)	940	13.5 <sup>d</sup>	37.7	—
Spinel (MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	790	7.6 <sup>d</sup>	15.0 <sup>e</sup>	—
Fused silica (SiO <sub>2</sub> )	740	0.4	1.4	—
Soda–lime glass	840	9.0	1.7	—
Borosilicate (Pyrex™) glass	850	3.3	1.4	—
<b>Polymers</b>				
Polyethylene (high density)	1850	106–198	0.46–0.50	—
Polypropylene	1925	145–180	0.12	—
Polystyrene	1170	90–150	0.13	—
Polytetrafluoroethylene (Teflon™)	1050	126–216	0.25	—
Phenol-formaldehyde, phenolic	1590–1760	122	0.15	—
Nylon 6,6	1670	144	0.24	—
Polyisoprene	—	220	0.14	—

## 4.3. Condutividade térmica



- **Condução térmica** é o fenômeno pelo qual calor é transportado a partir de regiões de alta temperatura para regiões de baixa temperatura de uma substância.
- A propriedade que caracteriza a capacidade de um material para transferir (transmitir) calor é a **condutibilidade térmica**.

## 4.3. Condutividade térmica

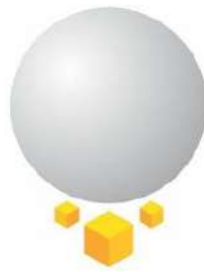


- Ela é melhor definida em termos da expressão:

$$q = -k \left( dT / dx \right)$$

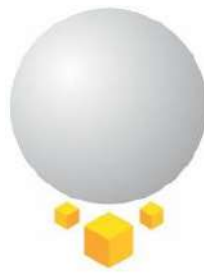
- Onde  $q$  denota o **fluxo de calor** por unidade de tempo por unidade de área (área sendo tomada como aquela perpendicular à direção do escoamento),  $k$  é a condutibilidade térmica e  $dT/dx$  é o *gradiente de temperatura* através do meio condutor.

## 4.3. Condutividade térmica



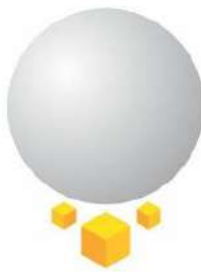
- As unidades de  $q$  e  $k$  são  $W/m^2$  (Btu/ft<sup>2</sup>.h) e  $W/m.K$  (Btu/ft.h.°F), respectivamente.
- A equação anterior é válida somente para escoamento de calor em regime permanente, isto é, para situações nas quais o fluxo de calor não varia com o tempo. O sinal negativo na expressão indica que o sentido de escoamento de calor é a partir da fonte quente para a fonte fria.





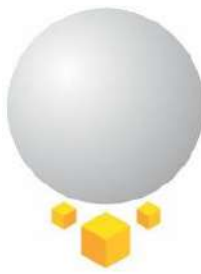
## 4.4. Tensões térmicas

- ***Tensões térmicas*** são tensões induzidas num corpo como um resultado de mudanças na temperatura.
- Um entendimento das origens e natureza de tensões térmicas é importante porque essas tensões térmicas conduzem à falha ou indesejável deformação plástica.



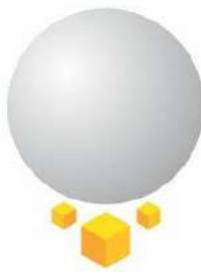
## 4.4. Tensões térmicas

- As tensões térmicas podem ser geradas por:
  - Expansão térmica constrangida;
  - Contração térmica;
  - Gradientes de temperatura e
  - Choque térmico de materiais frágeis.



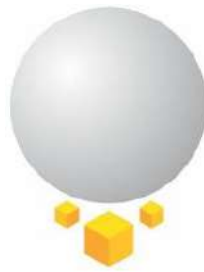
## 4.4. Tensões térmicas

- **Choque térmico** é a fratura de um corpo resultante de tensões térmicas induzidas por mudanças bruscas de temperatura.
- Uma vez que os materiais cerâmicos são frágeis, eles são especialmente susceptíveis a este tipo de fratura.



## 4.4. Tensões térmicas

- As duas fontes principais de tensões térmicas são a expansão térmica constrangida e gradientes de temperatura estabelecidos durante aquecimento e resfriamento.



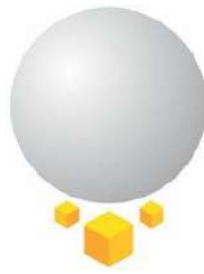
# 5. Propriedades elétricas

- A facilidade com a qual um material é capaz de transmitir corrente elétrica é expressa em termos de **condutibilidade elétrica** ou a sua recíproca, **resistividade elétrica**.
- Com base na sua condutibilidade, um material sólido pode ser classificado como um **metal**, um **semicondutor** ou como um **isolante**.



# 5. Propriedades elétricas

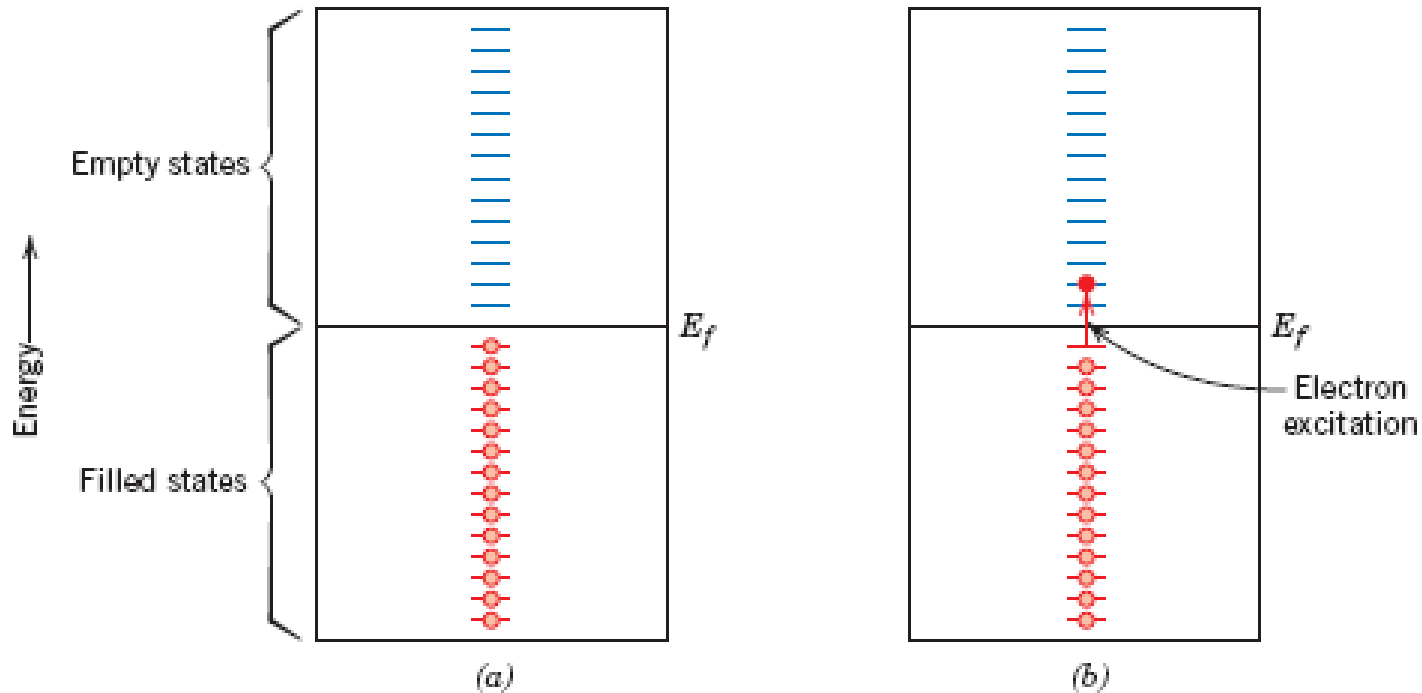
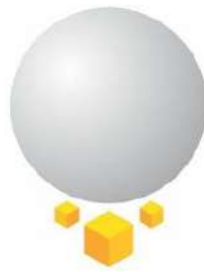
- Para materiais metálicos, resistividade elétrica **cresce** com o aumento da temperatura, do teor de impurezas e com a deformação plástica.
- A contribuição de cada componente para a resistividade total é aditiva.



# 5. Propriedades elétricas

- Semicondutores podem ser tanto elementos químicos (Si e Ge) quanto compostos covalentemente ligados.
- Com esses materiais, em adição a elétrons livres, buracos (elétrons ausentes na banda de valência) podem também participar no processo de condução.

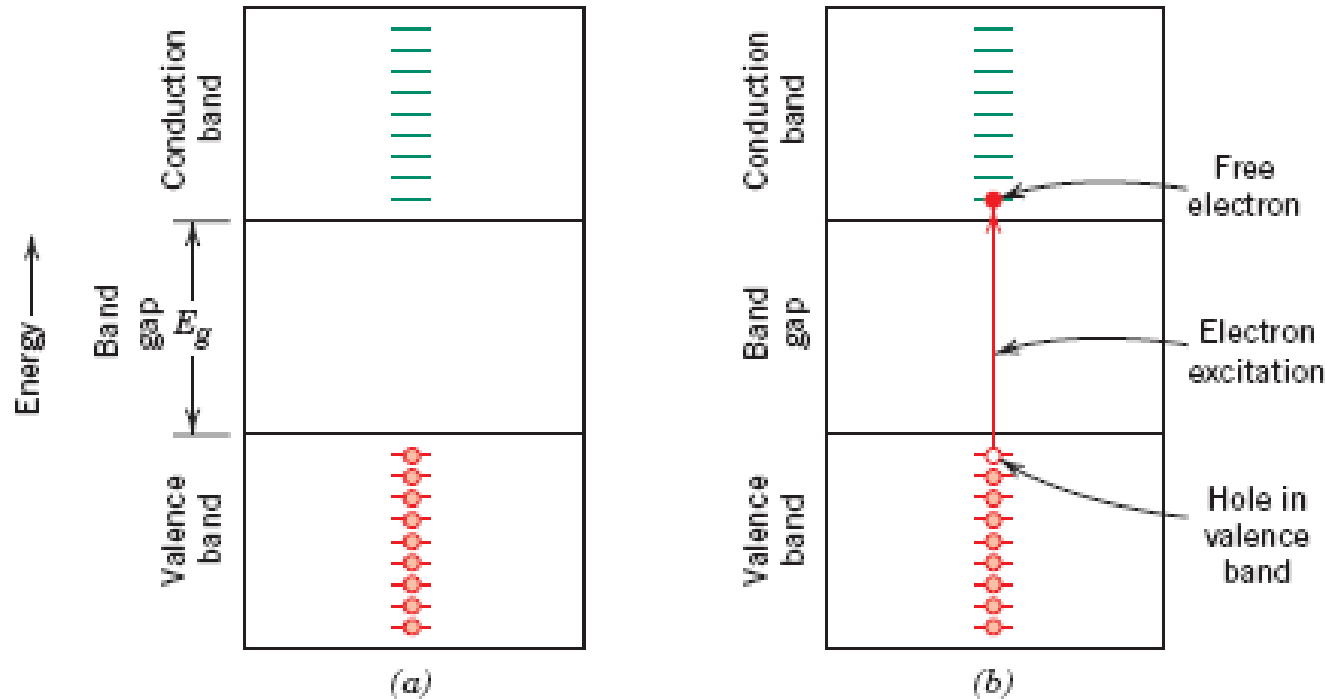
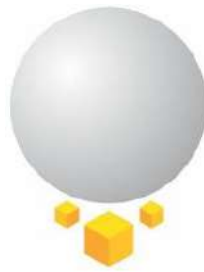
# 5. Propriedades elétricas



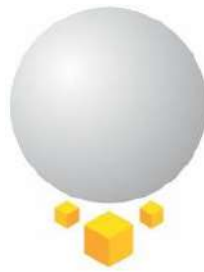
Ocupação de estados eletrônicos para um metal: (a) antes e (b) depois de uma excitação eletrônica.



# 5. Propriedades elétricas

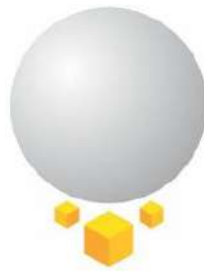


Ocupação de estados eletrônicos para um isolante ou semiconductor: (a) antes e (b) depois de uma excitação eletrônica a partir da banda de valência para a banda de condução, na qual tanto um elétron livre quanto um buraco são gerados.



# 5. Propriedades elétricas

- Com base no comportamento elétrico, semicondutores são classificados como ***intrínsecos*** ou ***extrínsecos***.
- Para comportamento intrínseco, as propriedades elétricas são inerentes ao material puro e concentrações de elétron e de buraco são iguais.



# 5. Propriedades elétricas

- Já para os semicondutores extrínsecos o comportamento elétrico é ditado por impurezas.
- Semicondutores extrínsecos pode ser tanto do tipo- $n$  quanto do tipo- $p$  dependendo dos portadores de carga predominantes serem elétrons ou buracos, respectivamente.