

Tópico 6 – Propriedades Mecânicas

Prof. Romis Attux – DCA/FEEC/UNICAMP
Primeiro Semestre / 2017

Obs.: O conteúdo dos slides se baseia
fortemente no livro texto [Callister, 2011].

Prelúdio

- Diversos materiais em operação estão sujeitos a forças ou cargas (e.g. o eixo de aço de um carro). Em casos assim, é preciso conhecer as características do material e projetar o dispositivo associado de modo que a deformação resultante não seja excessiva e não ocorra uma fratura.
- O comportamento mecânico de um material diz respeito à sua resposta ou deformação quando da aplicação de uma força ou carga. Algumas propriedades importantes são resistência, dureza, ductilidade e rigidez.
- A verificação das propriedades de um material se dá, tipicamente, em ensaios controlados realizados em laboratório, os quais buscam reproduzir tão fielmente quanto possível as condições de operação.
- A carga pode ser de tração, compressão ou cisalhamento; a magnitude pode ser constante ou flutuante; o tempo de ensaio pode ser constante ou variável e a temperatura pode ser um fator de grande relevância.

Tensão e Deformação

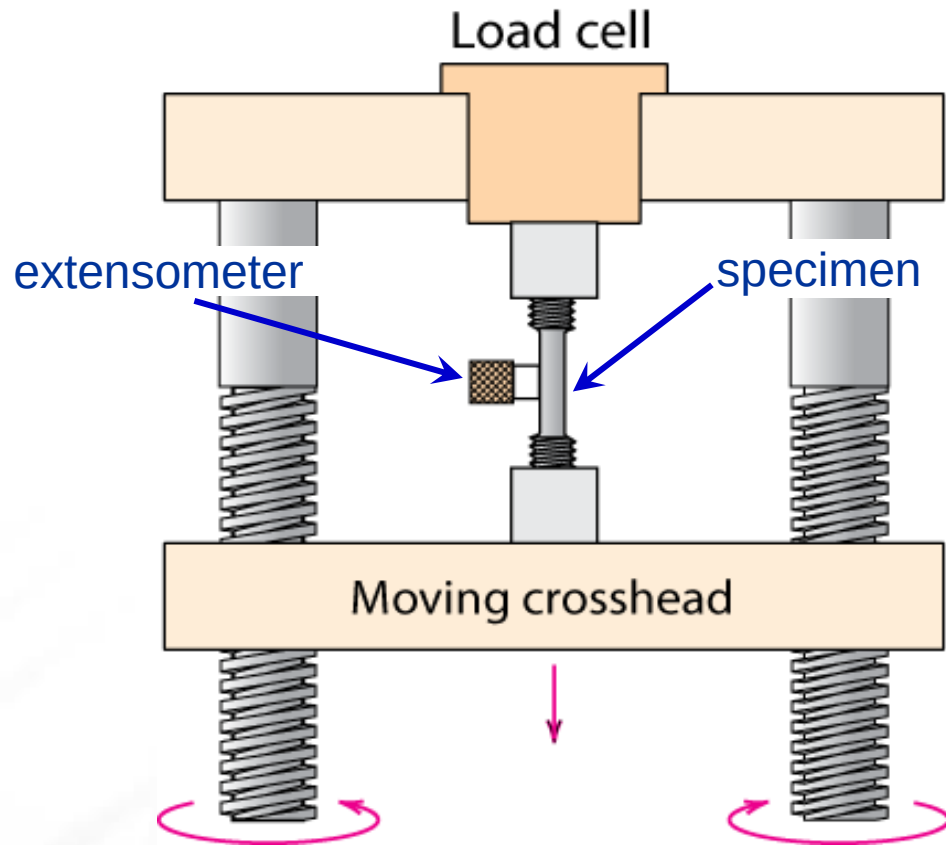
- Se uma carga é estática ou se modifica de maneira lenta e é aplicada uniformemente sobre uma seção reta ou superfície de um membro, o comportamento mecânico do material pode ser levantado por meio de um ensaio de **tensão – deformação**.
- Existem três maneiras principais de se aplicar uma carga: tração, compressão ou cisalhamento. Também é possível considerar uma carga de torção. No curso, discutiremos em detalhes apenas os dois primeiros tipos de cargas.

Ensaio de Tração

- Um dos mais clássicos ensaios de tensão – deformação é conduzido sob tração. Tal ensaio pode revelar diversas características importantes em projetos.
- Deforma-se gradativamente uma amostra pela aplicação de uma carga de tração, geralmente até a ruptura. A carga é aplicada uniaxialmente, ao longo do eixo maior de um corpo de prova.
- Normalmente os corpos de prova possuem seção circular, embora também sejam empregados corpos retangulares.
- O resultado de um ensaio desse tipo é registrado na forma de gráfico ou tabela de carga / força em função do alongamento.
- As características verificadas são dependentes do tamanho do corpo de prova – por exemplo, se a seção do corpo for dobrada, será necessária uma força duas vezes maior para produzir o mesmo alongamento.

Ensaio de Tração

- Typical tensile test machine



- Typical tensile specimen

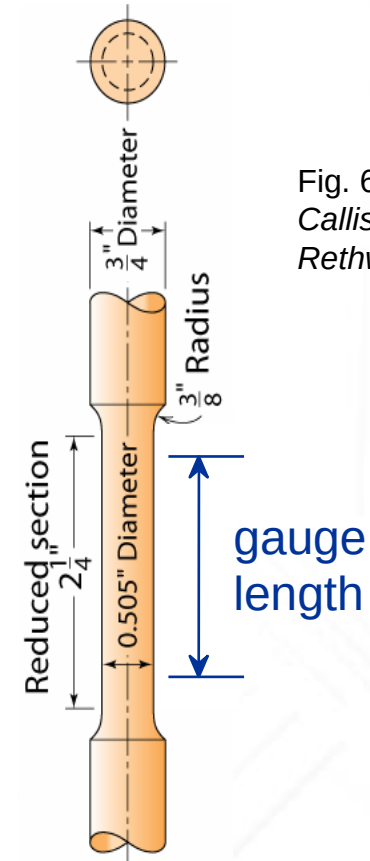


Fig. 6.2,
Callister &
Rethwisch 9e.

Ensaio de Tração

- Para corrigir esse ponto, a carga e o alongamento são normalizados de acordo com seus respectivos parâmetros de tensão de engenharia e deformação de engenharia. A tensão de engenharia é definida como:

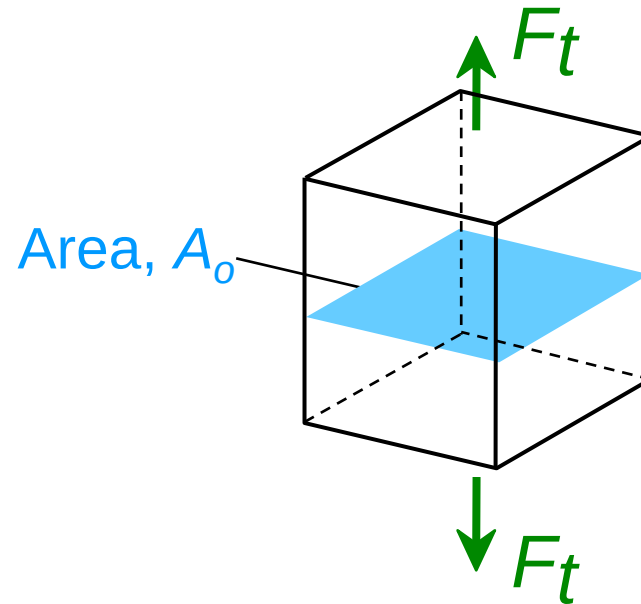
$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

sendo F a carga instantânea aplicada a uma seção perpendicular à seção reta do corpo de prova, em unidades de newton (N) ou libras-força, e A_0 a área da seção reta original (antes da aplicação de qualquer carga), em metros quadrados ou polegadas quadradas.

- A unidade de tensão é tipicamente o megapascal (MPa), equivalente a um milhão de newtons por metro quadrado. Também se usa a libra-força por polegada quadrada (psi).

Tensão de Engenharia

- Tensile stress, σ :



$$\sigma = \frac{F_t}{A_0} = \frac{\text{lb}_f}{\text{in}^2} \text{ or } \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

original cross-sectional area
before loading

Ensaio de Tração

- A deformação de engenharia ϵ é definida como:

$$\epsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$$

onde l_0 é o comprimento original (antes da aplicação de uma carga) e l_i é o comprimento instantâneo. A grandeza Δl representa o alongamento de deformação. Note que a deformação não possui unidade, podendo às vezes ser representada de forma percentual.

Ensaio de Compressão

- Um ensaio de compressão é realizado de maneira semelhante a um ensaio de tração, mas a força atuante é compressiva e o corpo de prova se contrai ao longo da direção da tensão.
- Utilizam-se as definições dadas anteriormente para calcular a tensão e a deformação compressivas. Por definição, uma força compressiva tem sinal negativo, valendo o mesmo para σ . Note que, forçosamente, ε também terá sinal negativo.
- Os ensaios de compressão são usados para conhecer o comportamento de um material frente a deformações grandes e permanentes, ou quando o material é frágil sob tração.

Comportamento Tensão - Deformação

- O grau de deformação de uma estrutura depende da magnitude da tensão imposta. Para a maioria dos materiais que são submetidos a níveis de tração relativamente baixos, vale a relação de proporcionalidade:

$$\sigma = E\epsilon$$

onde E é a constante de proporcionalidade que recebe o nome de **módulo de elasticidade** do material, ou **módulo de Young**. A lei apresentada nada mais é que uma versão da **lei de Hooke**.

- A magnitude de E para os metais típicos varia entre 45 GPa (magnésio) e 407 GPa (tungstênio). Os materiais cerâmicos possuem módulos entre 70 e 500 GPa e os polímeros entre 0,007 e 4 GPa.

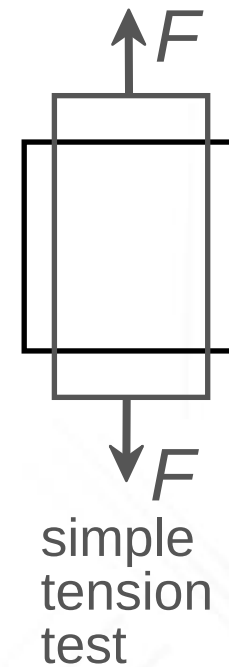
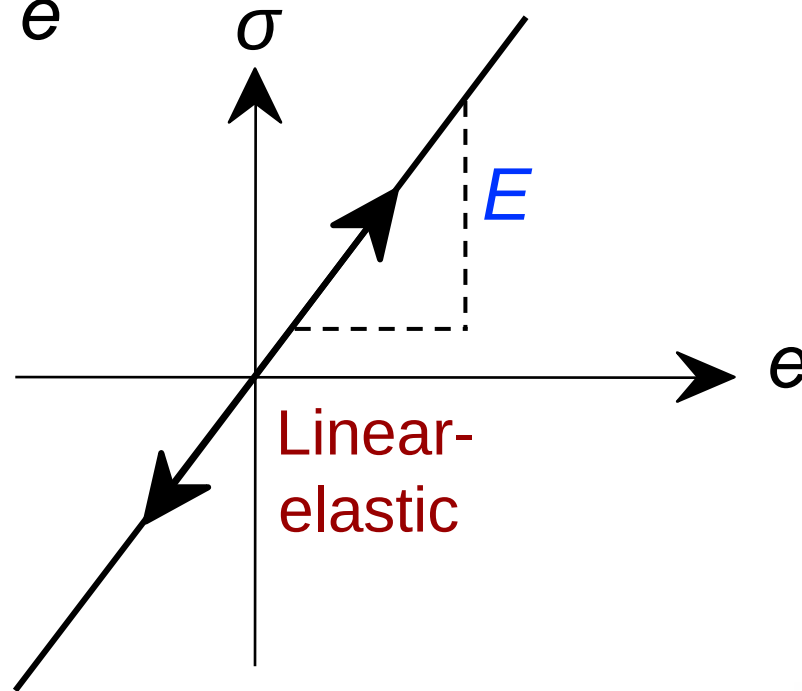
Deformação Elástica

- Quando a lei de proporcionalidade apresentada vale, tem-se uma **deformação elástica**. Nesse caso, o gráfico deformação – tensão é uma reta com inclinação igual a E . Esse módulo de elasticidade pode ser considerado como representativo da rigidez ou resistência do material frente a uma deformação elástica. Quanto maior for o módulo, mais rígido é o material, e menor será a deformação elástica resultante de uma dada tensão.
- A deformação elástica não é permanente, ou seja, quando se deixa de aplicar a tensão, a peça volta a ter seu comprimento original. Na referida reta, esse processo corresponderia a uma trajetória rumo à origem.
- Existem materiais (ferro fundido cinzento, concreto, alguns polímeros) para os quais a porção elástica da curva tensão – deformação é não-linear. Nesse caso, determina-se um módulo tangencial ou um módulo secante.
- O módulo tangencial seria definido como a derivada do gráfico e o módulo secante seria dado pela inclinação da reta ligando a origem a certo ponto.

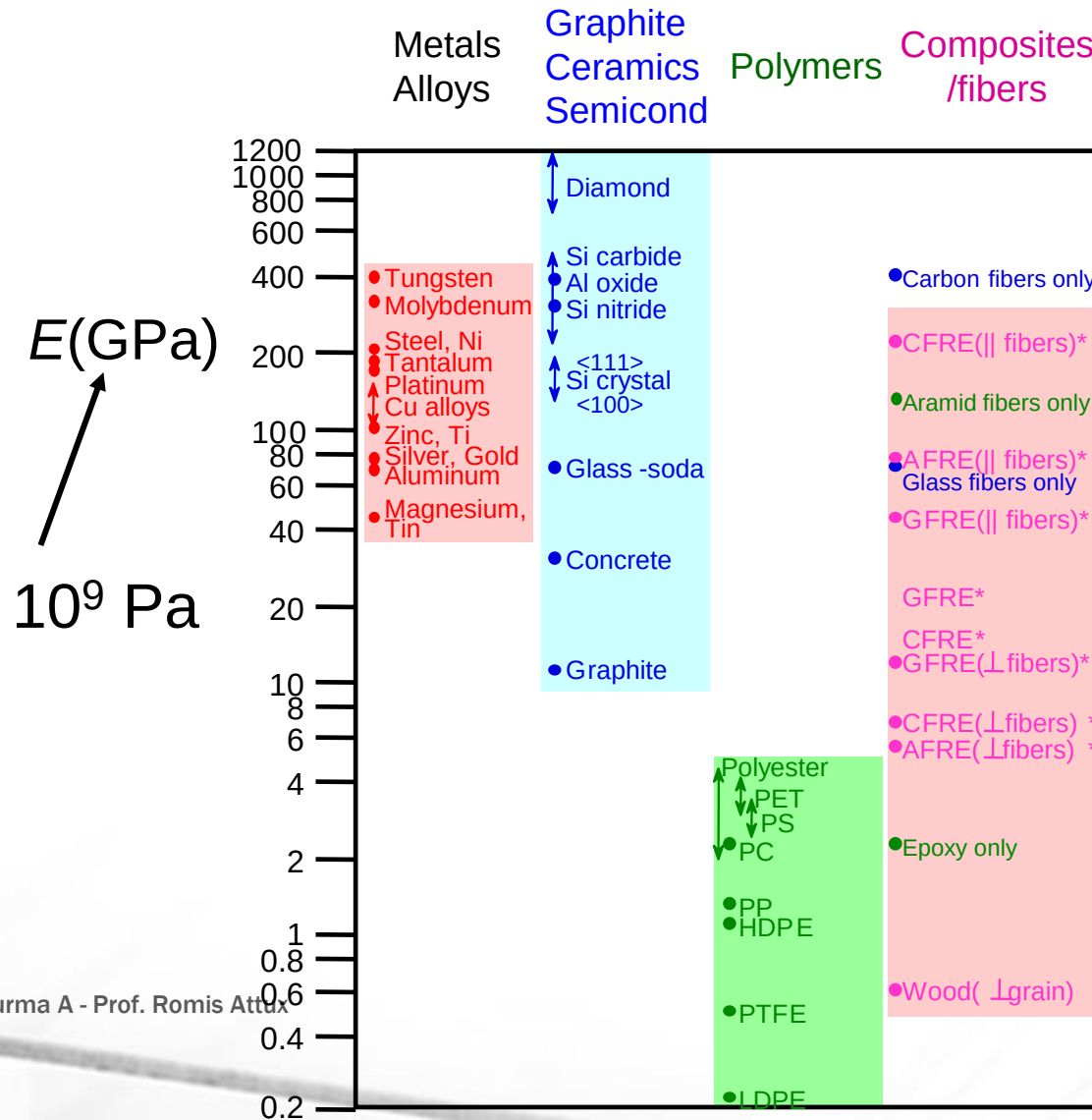
Deformação Elástica

- **Hooke's Law:**

$$\sigma = E e$$



Módulo de Young

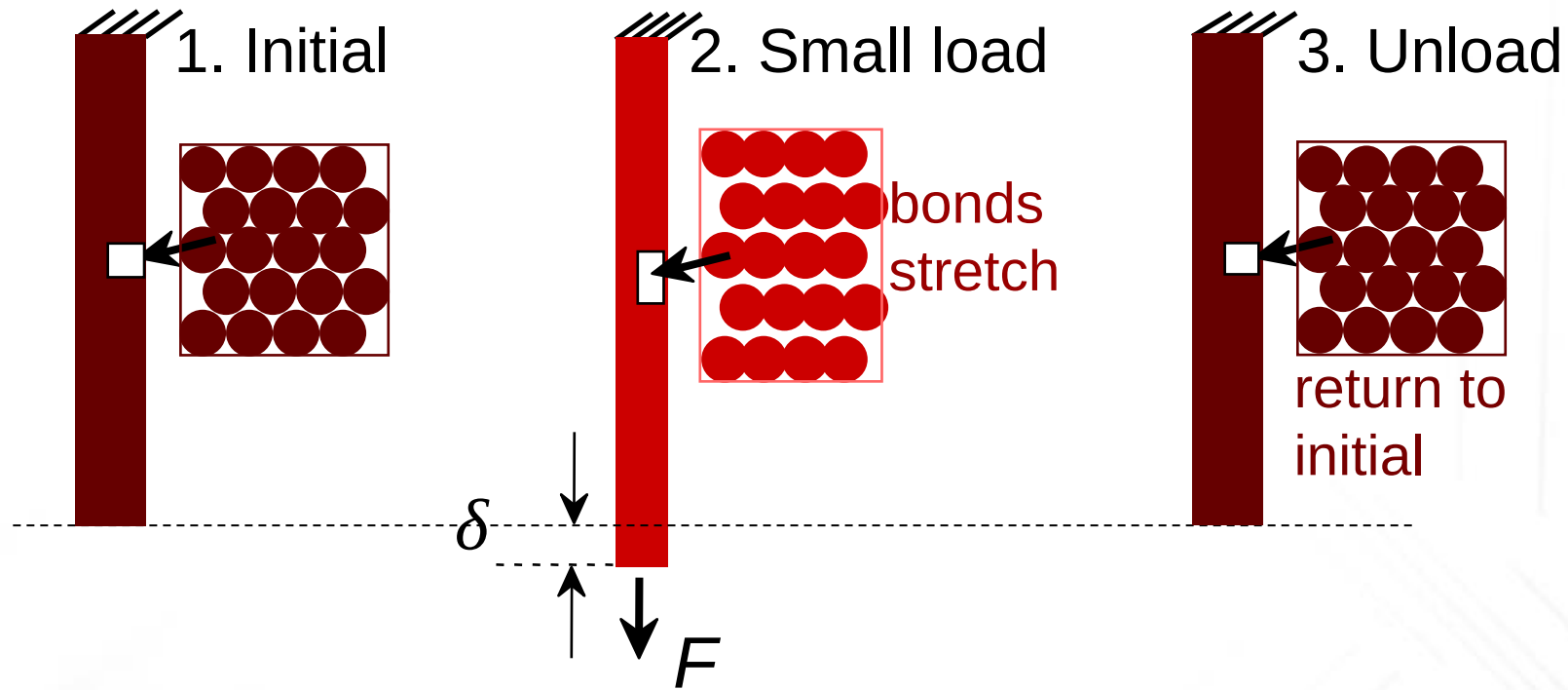


Based on data in Table B.2, *Callister & Rethwisch 9e*.
 Composite data based on reinforced epoxy with 60 vol% of aligned carbon (CFRE), aramid (AFRE), or glass (GFRE) fibers.

Deformação Elástica

- Do ponto de vista microscópico, o processo de deformação elástica pode ser visto como resultante de pequenas variações no espaçamento interatômico e na extensão das ligações interatômicas. Portanto, o módulo de elasticidade reflete uma medida de resistência à separação entre átomos / moléculas / íons adjacentes – i.e. forças de ligação.
- As diferenças nos valores do módulo de elasticidade para metais, cerâmicas e polímeros decorrem diretamente dos tipos de ligações que caracterizam cada um desses materiais.
- Vale frisar que o comportamento de compressão para baixos níveis de tensão é perfeitamente análogo ao de tração, inclusive do ponto de vista do valor do módulo de elasticidade.

Deformação Elástica



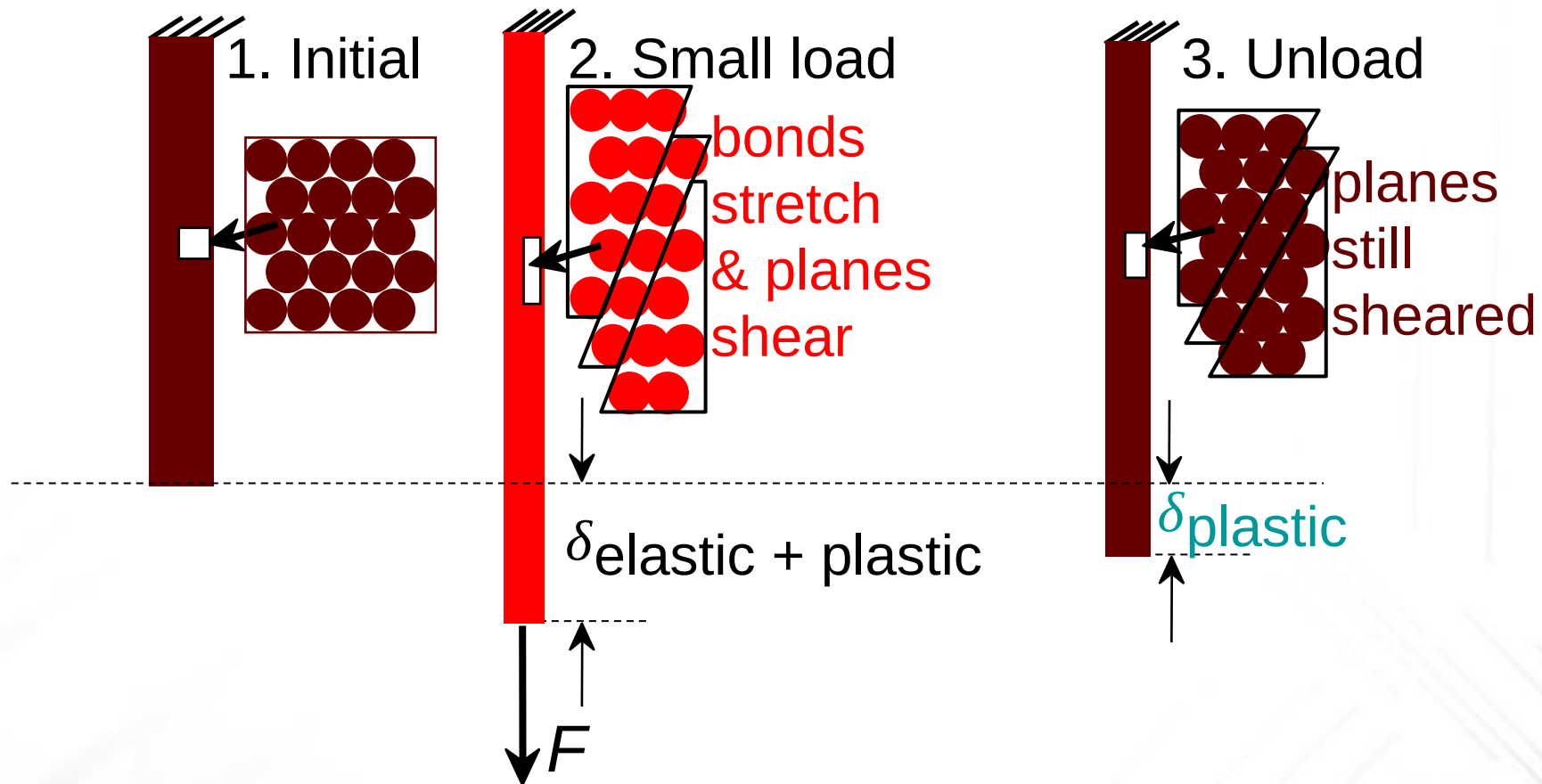
Anelasticidade

- Até agora, consideramos que, na deformação elástica, ao cessar a aplicação da carga, volta-se de imediato ao comprimento original.
- No entanto, é praxe que haja um intervalo de tempo transcorrido desde o fim da aplicação da carga até o retorno ao comprimento original – esse comportamento dependente do tempo é conhecido como **anelasticidade**.
- A anelasticidade se deve a processos microscópicos dependentes do tempo que acompanham a deformação. Para os metais, a componente anelástica é pequena, sendo comumente desprezada, mas, para alguns polímeros, por exemplo, ela pode ser muito relevante.

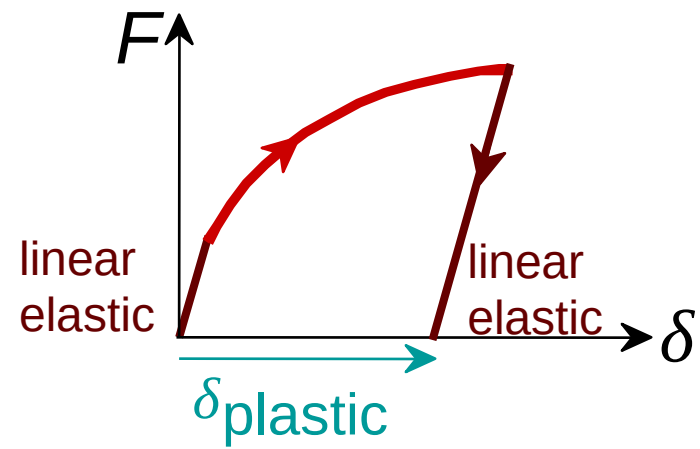
Comportamento Mecânico dos Metais

- Para a maior parte dos materiais metálicos, o regime de deformação elástica persiste apenas até deformações da ordem de 0,005. Além desse ponto, não mais vigora a lei de Hooke, e tem lugar uma deformação permanente, não-recuperável, denominada **deformação plástica**.
- Na curva deformação x tensão, a transição entre regimes é gradual para a maioria dos metais. Surge uma curvatura no ponto de mudança, e ela se acentua com o aumento da tensão.
- Do ponto de vista microscópico, ocorre o rompimento de ligações atômicas originais e a formação de novas ligações com outros átomos vizinhos. Com a remoção da tensão, não há retorno às posições originais.

Deformação Plástica



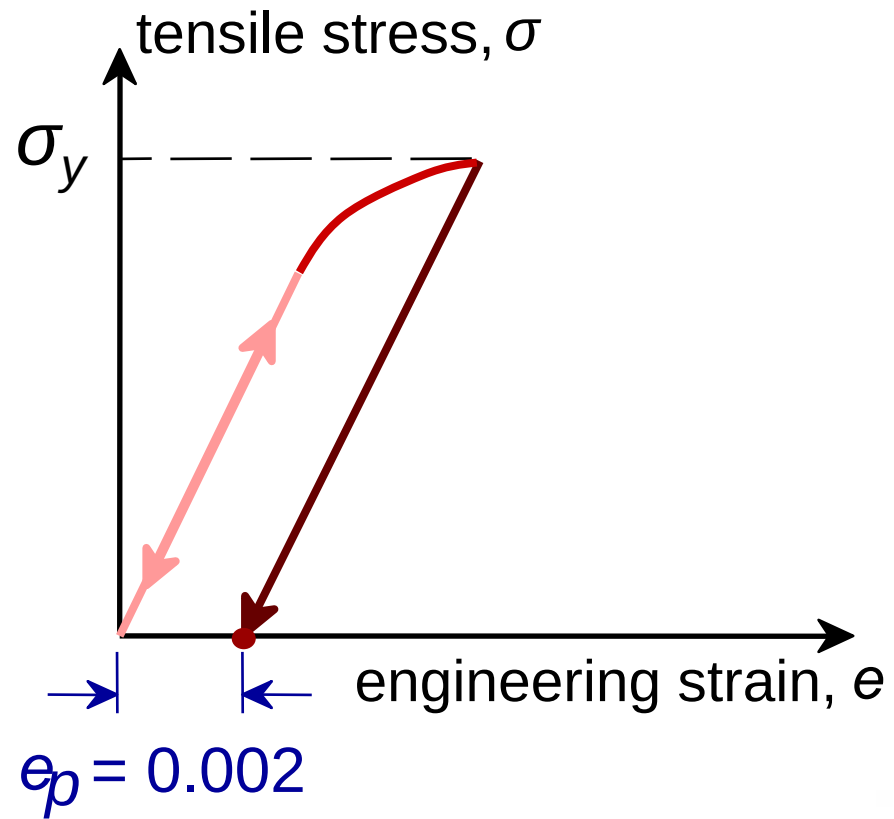
Deformação Plástica



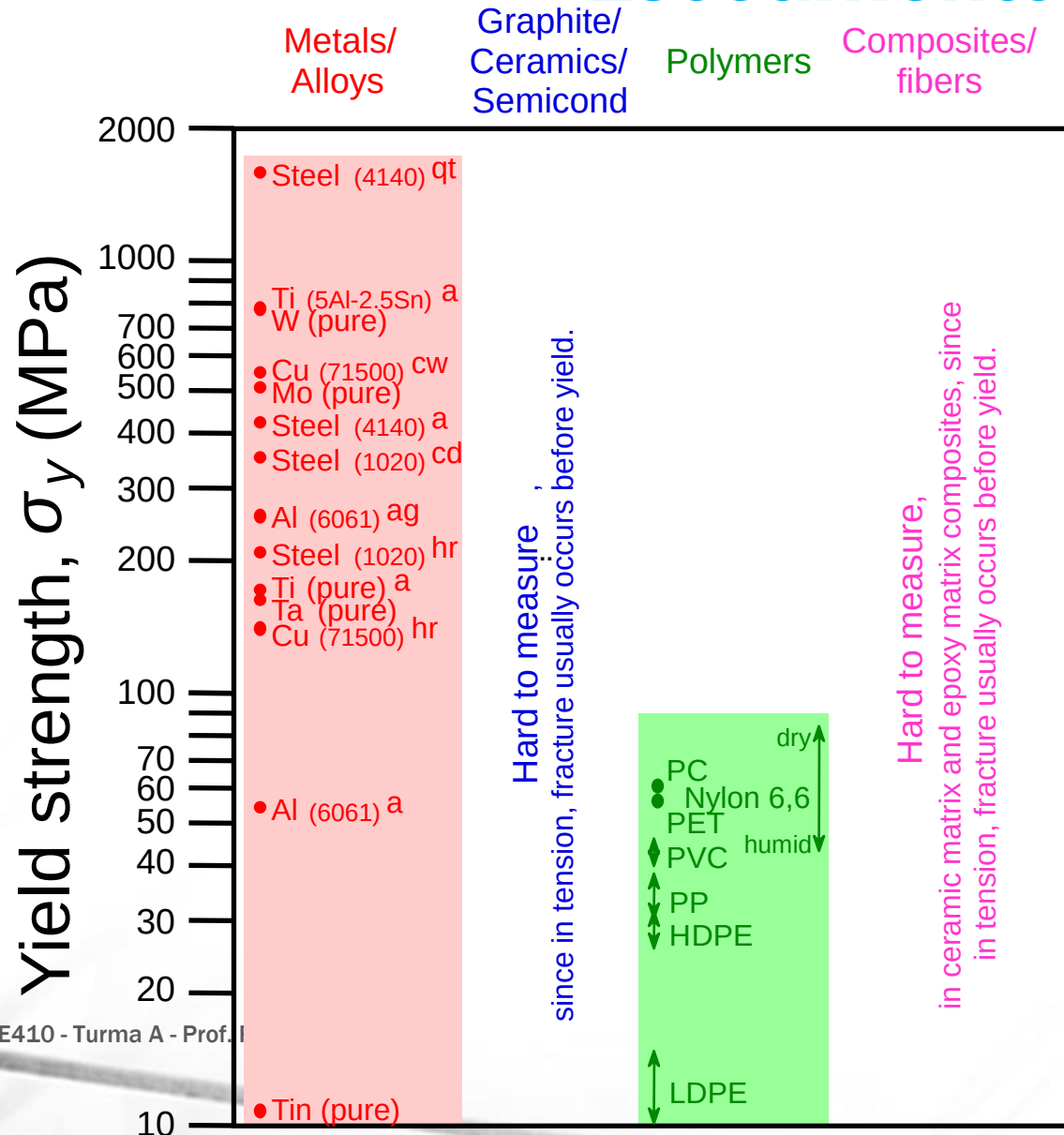
Escoamento

- A maior parte das estruturas é projetada para admitir apenas uma deformação elástica quando da aplicação da tensão. Portanto, é oportuno conhecer o ponto onde há a mudança de regime para o de deformação plástica, ou seja, onde ocorre o fenômeno de **escoamento**.
- Para os metais em que a mudança de regime é gradual, esse ponto é exatamente o ponto em que deixa de valer a regra de proporcionalidade (lei de Hooke), ou seja, o **limite de proporcionalidade**.
- Usualmente não se pode determinar esse ponto com precisão, e então se recorre ao seguinte expediente: toma-se uma pré-deformação específica (tipicamente 0,002) e traça-se a reta paralela à dada pela lei de Hooke. O ponto de cruzamento dessa reta com a curva deformação - tensão define a chamada **tensão de escoamento** (σ_l).
- Se o material tiver uma característica não-linear de curva, a praxe é definir a tensão necessária para produzir determinado nível de deformação (e.g. 0,005).

Escoamento



Escoamento



Room temperature values

Based on data in Table B.4,
Callister & Rethwisch 9e.

- a = annealed
- hr = hot rolled
- ag = aged
- cd = cold drawn
- cw = cold worked
- qt = quenched & tempered

Pico de escoamento Descontínuo

- Alguns aços e outros materiais exibem um comportamento curioso: eles obedecem à lei de Hooke até determinada deformação e, então, no limite superior de escoamento, ocorre uma queda abrupta de tensão (escoamento descontínuo).
- A deformação que se segue flutua em torno de determinado valor (limite inferior de escoamento), até que volte a ocorrer um crescimento na curva. Toma-se então a média desse limite inferior como tensão limite de escoamento, uma vez que ela é bem determinada.
- As tensões limite de escoamento podem variar de 35 MPa para um alumínio de baixa resistência até 1400 MPa para aços de elevada resistência.

Limite de Resistência à Tração

- Após a ocorrência do escoamento, a tensão necessária para provocar deformação plástica em metais aumenta até um valor máximo (**limite de resistência à tração - LRT**), diminuindo em seguida até a fratura final do material.
- Nessa tensão, começa a se formar uma pequena constricção (estrangulamento ou pescoço), num fenômeno denominado “empescoçamento”, e a fratura ocorre nesse pescoço. A resistência à fratura corresponde à tensão aplicada no momento em que ocorre a fratura.
- Os valores de LRT podem variar de cerca de 50 MPa (alumínio) até 3000 MPa (aços de elevada resistência).
- Normalmente, quando a resistência de um metal é quantificada para projeto, utiliza-se a tensão limite de escoamento, pois, no LRT, já pode ter havido uma deformação muito expressiva e disfuncional.
- Resistências a fraturas não costumam ser especificadas em projetos de engenharia.

Limite de Resistência à Tração

