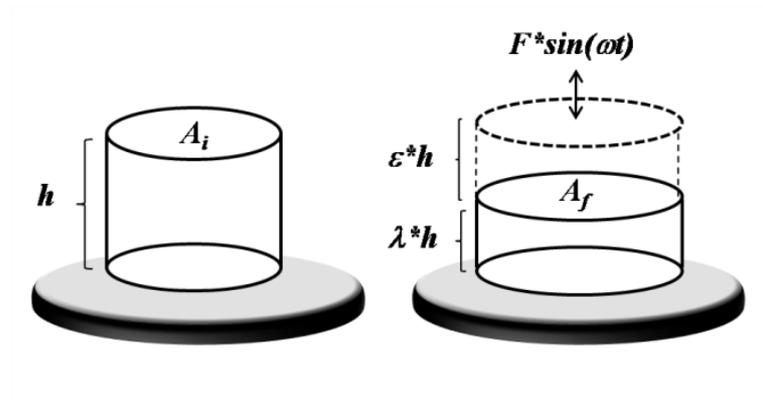
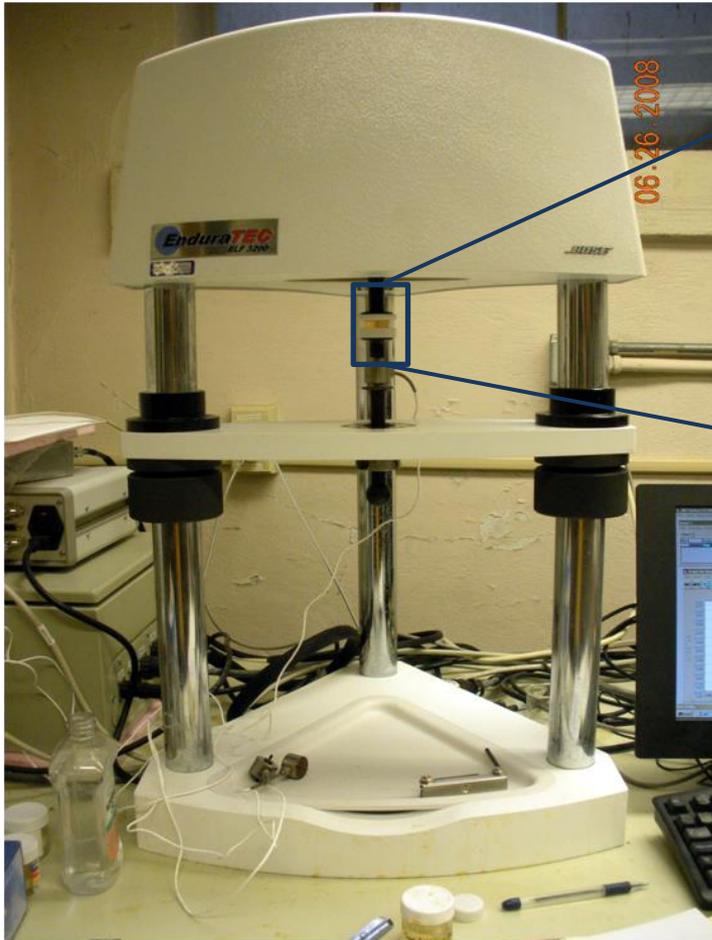


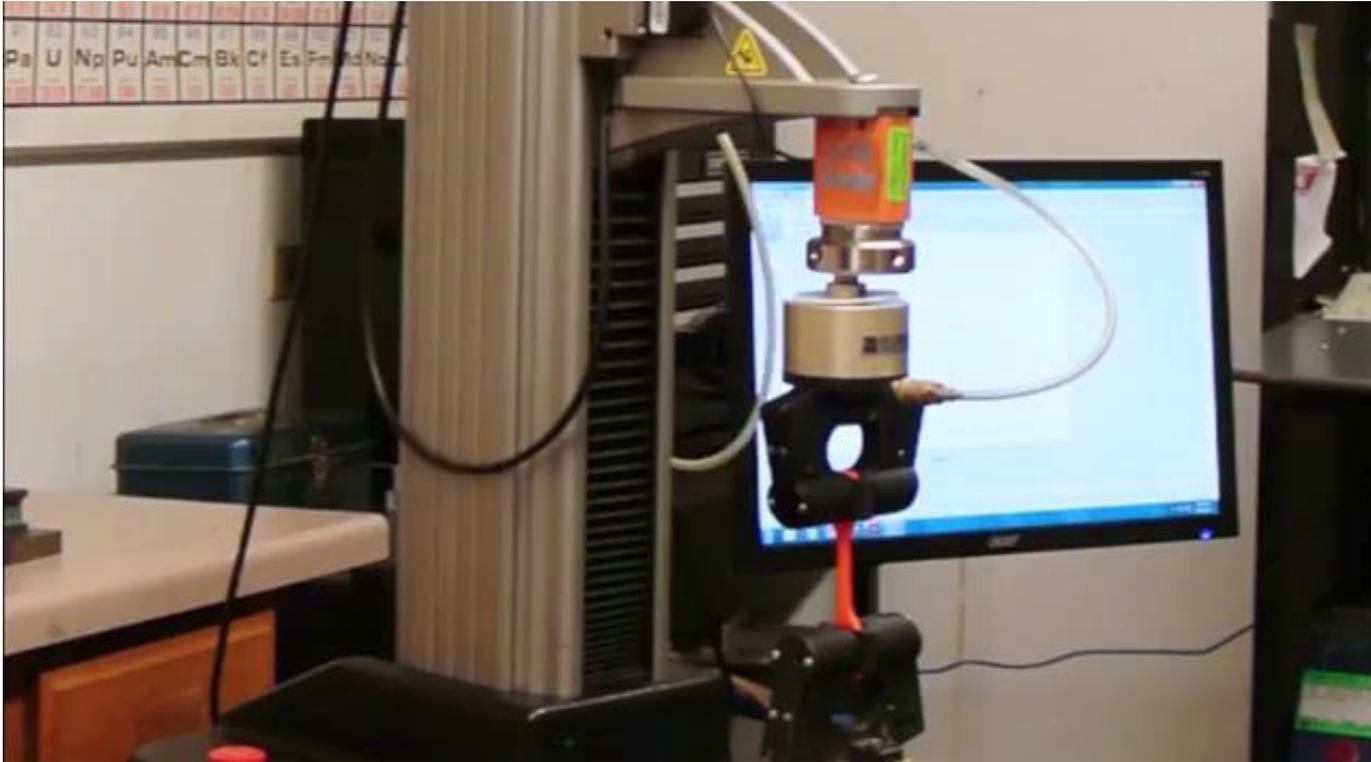
Propriedades mecânicas dos tecidos

Prof. Theo Z. Pavan

Ensaio mecânico



Ensaio mecânico



<https://gfycat.com/hairymedicalichthyostega>

Relações constitutivas

- Uma relação constitutiva é uma relação entre duas grandezas físicas que é **específica de um material ou classe de materiais**.
- As relações matemáticas que descrevem a resposta de um material a cargas aplicadas sob condições de interesse são chamadas de relações constitutivas porque essa resposta depende da composição interna, ou constituição, do material.

Relações constitutivas

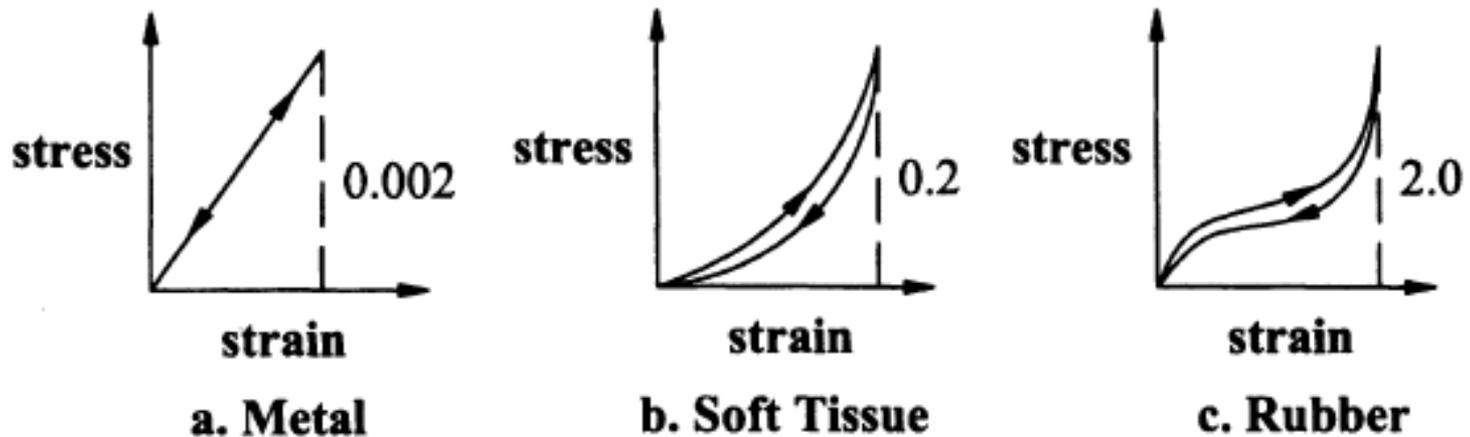


FIGURE 2.23 Qualitative comparison of the stress–strain behavior of three classes of materials: metals, soft tissues, and elastomers. Note the different order of magnitudes of the associated strains (from 0.002 to 2.0) and that the soft tissues and elastomers not only exhibit nonlinear behaviors, but they also reveal a slight hysteresis (i.e., noncoincident loading and unloading curves). The values of stress would obviously be very different as well, but we simply emphasize the general character of the curves here.

Relações constitutivas

- Até mesmo metais e ligas metálicas diferentes respondem de maneira diferente por causa das diferenças em sua composição interna.
- Assim também para tecidos de **colágenos** como **tendões e a córnea**, cada um dos quais consistindo principalmente de colágeno tipo I, embora com **arranjos microestruturais muito diferentes**.
- Da mesma forma, as **condições** de interesse **devem ser especificadas**. Por exemplo, características variam com a **temperatura**.

Condições que devem ser analisadas

- Linearidade
- Elasticidade
- Homogeneidade
- Isotropia
- Plasticidade

Linear vs. não-linear

- **Metais e ossos tendem a exibir uma resposta linear de tensão-deformação** sob pequenas deformações (ou seja, deformações que não causam mudanças permanentes na microestrutura e, portanto, nas propriedades).

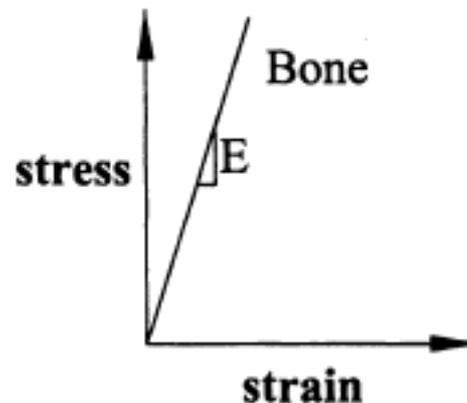


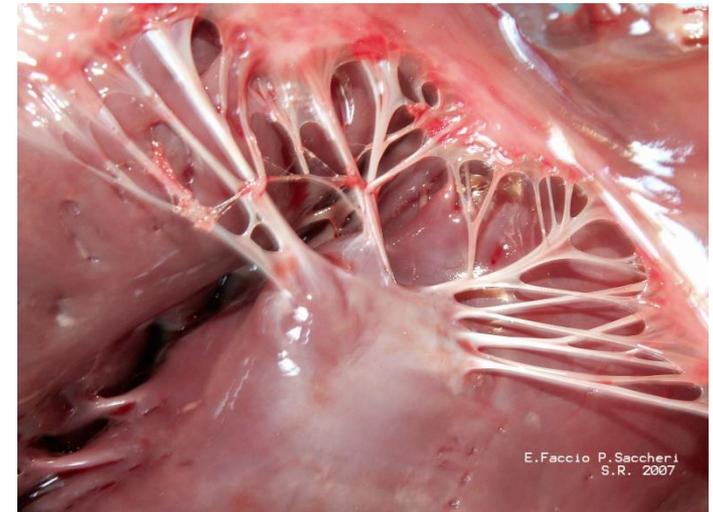
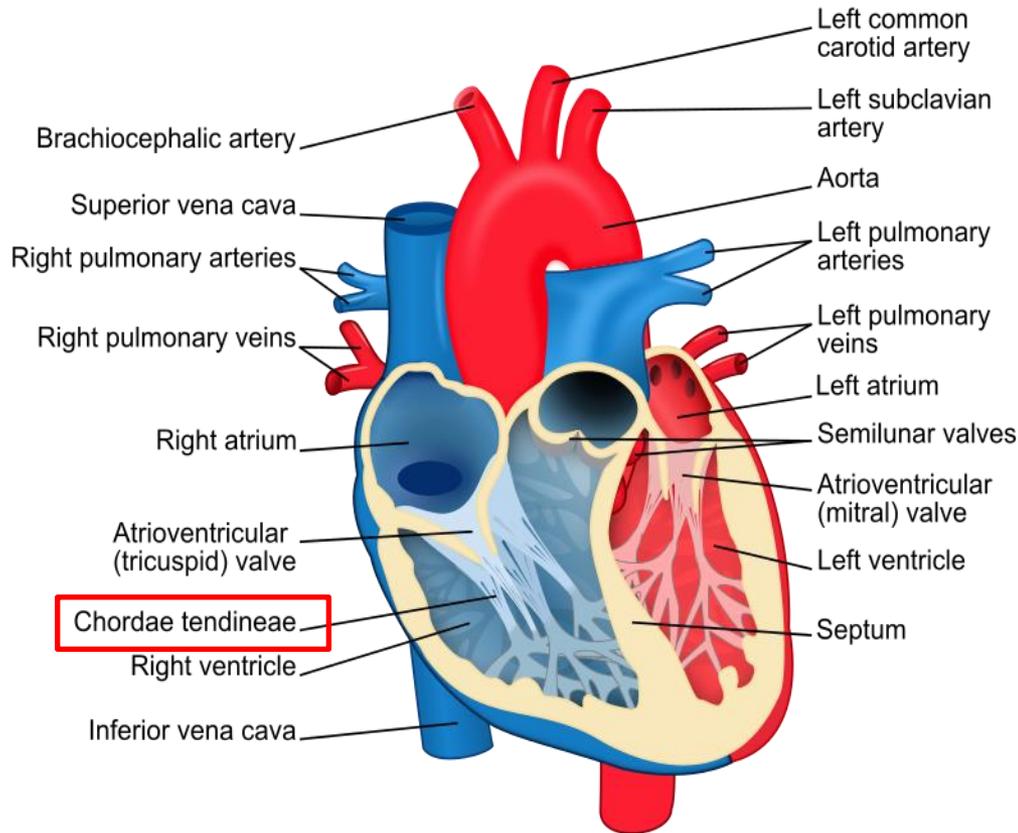
FIGURE 2.27 Schema of stress–strain data from bone prior to yield, which reveals an initially linear, nearly elastic response. Note that bone (type I collagen impregnated with hydroxyapatite) is much stiffer and less extensible than the chordae (Fig. 2.26; primarily type I collagen).

Linear vs. não-linear

- Elastômeros (borracha, por exemplo) e **tecidos moles tendem a exibir respostas não lineares de tensão-deformação** sob grandes deformações sem uma mudança permanente na estrutura.
- Os elastômeros e tecidos moles exibem comportamentos muito diferentes de metais por causa de sua **estrutura polimérica de cadeia longa**.
- Muito do comportamento desses materiais depende de **mudanças nas conformações das moléculas**.

Cordas tendinosas

Cordas tendinosas são tendões que ligam cada cúspide das válvulas cardíacas aos músculos papilares nos ventrículos do coração, o que impede que as válvulas se invertam durante a contração ventricular.



Linear vs. não-linear

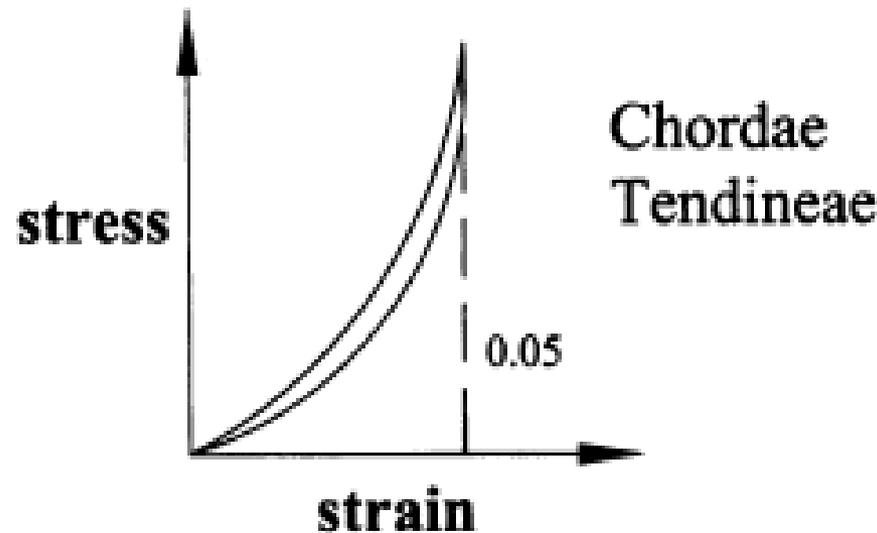


FIGURE 2.26 Schema of stress–strain data from a uniaxial test on an excised chordae tendineae, the thin stringlike tissue that connects the heart valve to the papillary muscle. Note the small, but not infinitesimal, strain. Many ligaments and tendons exhibit similar behavior.

Trabalho e energia de deformação

- Na dinâmica, o **trabalho** realizado é definido como o **produto da força pela distância percorrida** na direção da força aplicada, e a **energia é a capacidade** de um sistema para **realizar o trabalho**.

Trabalho e energia de deformação

- O produto da tensão pela deformação é igual ao trabalho realizado em um corpo por unidade de volume desse corpo.
- Ou o trabalho interno realizado no corpo pelas forças externamente aplicadas.

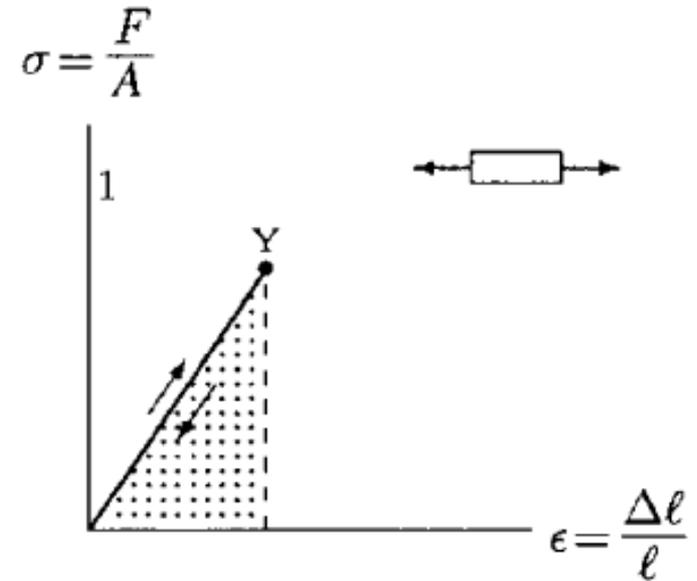


Fig. 13.21 Internal work done and elastic strain energy per unit volume

Trabalho e energia de deformação

- Para um **corpo elástico**, esse trabalho é **armazenado como uma energia de deformação elástica interna**, e é a **liberação dessa energia que traz o corpo de volta à sua forma original** após a descarga.

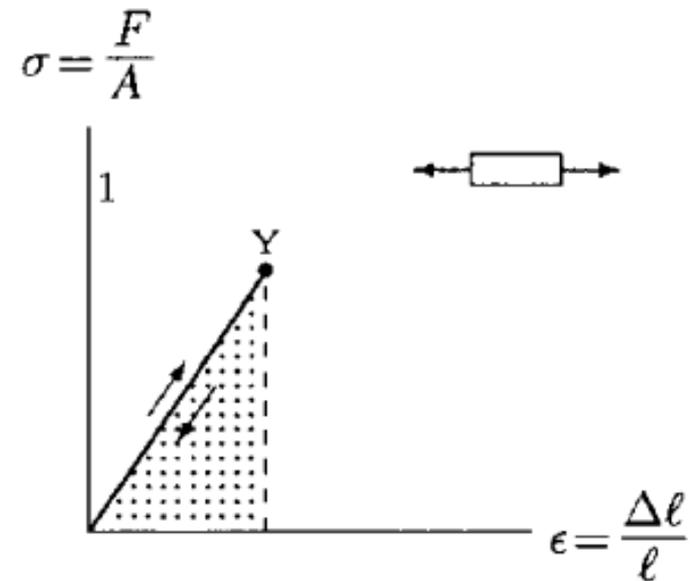


Fig. 13.21 *Internal work done and elastic strain energy per unit volume*

Comportamento elástico

- Um material elástico não dissipa energia quando é deformado.
- Material elástico responde instantaneamente à carga aplicada.
- Metais apresentam resposta elástica a pequenas deformações. Enquanto tecidos são “menos” elásticos.
- Tecidos moles são viscoelásticos.

Elástico vs. Viscoelástico

Material elástico

Não apresenta dissipação de energia

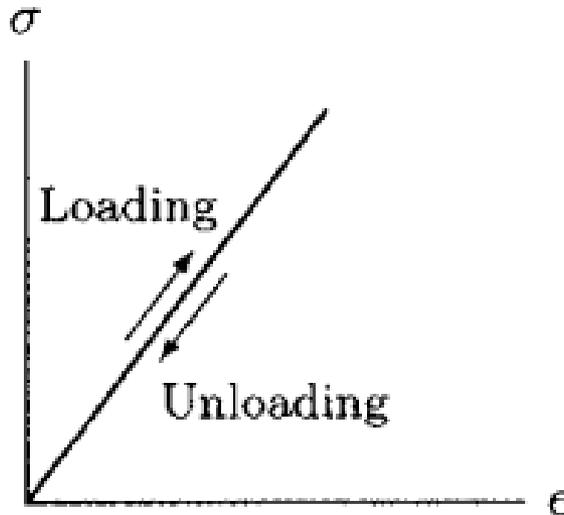


Fig. 15.14 For an elastic material, loading and unloading paths coincide

Material Viscoelástico

Energia é dissipada devido à componente de viscosidade

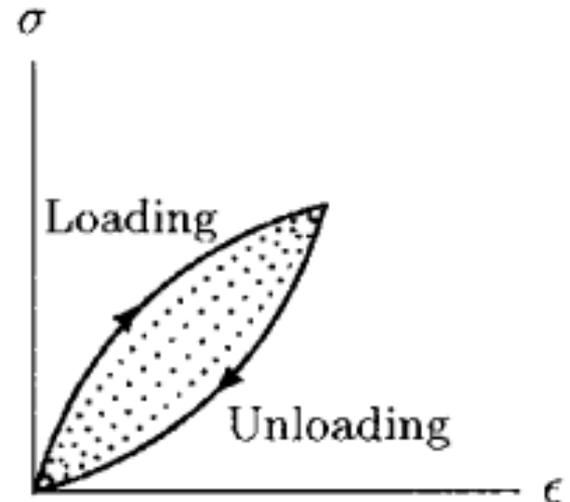


Fig. 15.15 Hysteresis loop

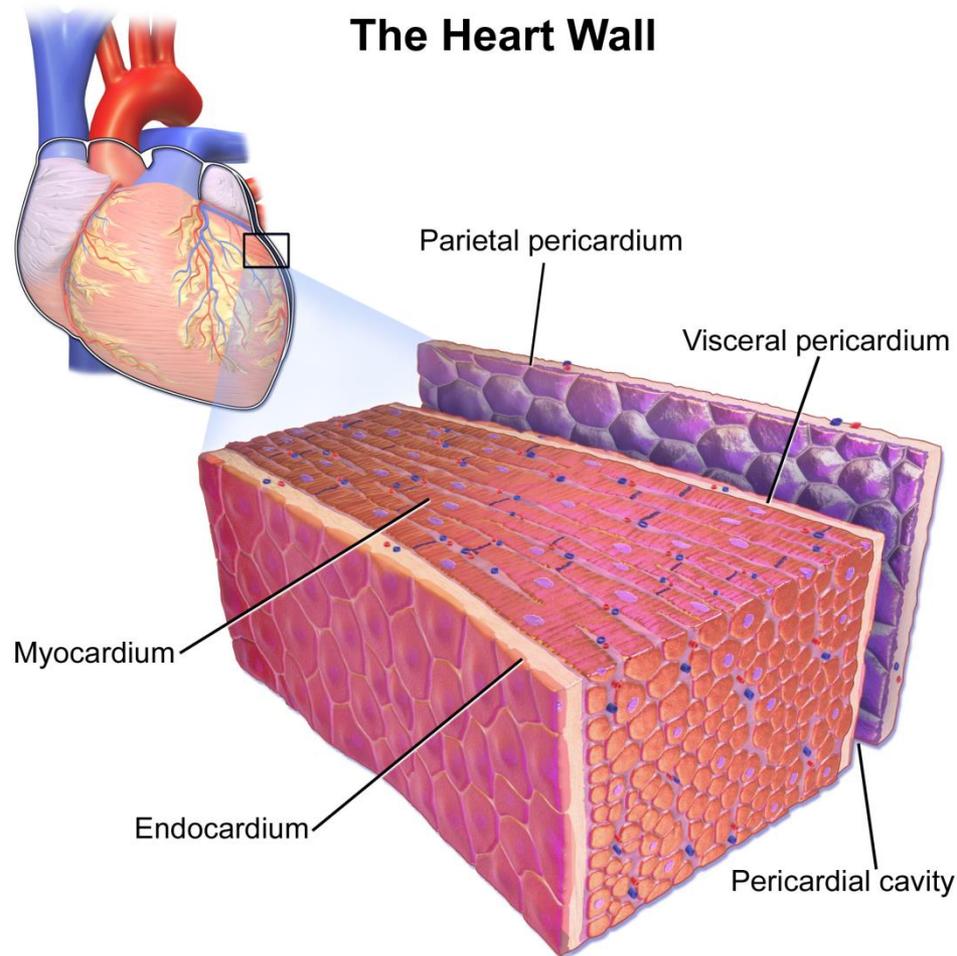
Homogeneidade

- O material é considerado **homogêneo** se suas características mecânicas **não dependem da região do corpo** que foi analisada.
- Embora tecidos moles são materiais heterogêneos, em muitas situações é **razoável considerar um comportamento homogêneo**.
- Por exemplo, quando se estuda a pele, pulmão, tecido cerebral, osso, e outros.

Resposta isotrópica

- Se o comportamento do material **não depende de sua orientação**, se diz que sua resposta é **isotrópica**.
- Muitos materiais como metais e borrachas podem ser considerado isotrópicos dentro de limites aceitáveis
- A maioria dos **tecidos** apresentam comportamento **anisotrópico**.

A parede do coração é constituída por três camadas: o **epicárdio**, o **miocárdio** e o **endocárdio**



Resposta anisotrópica

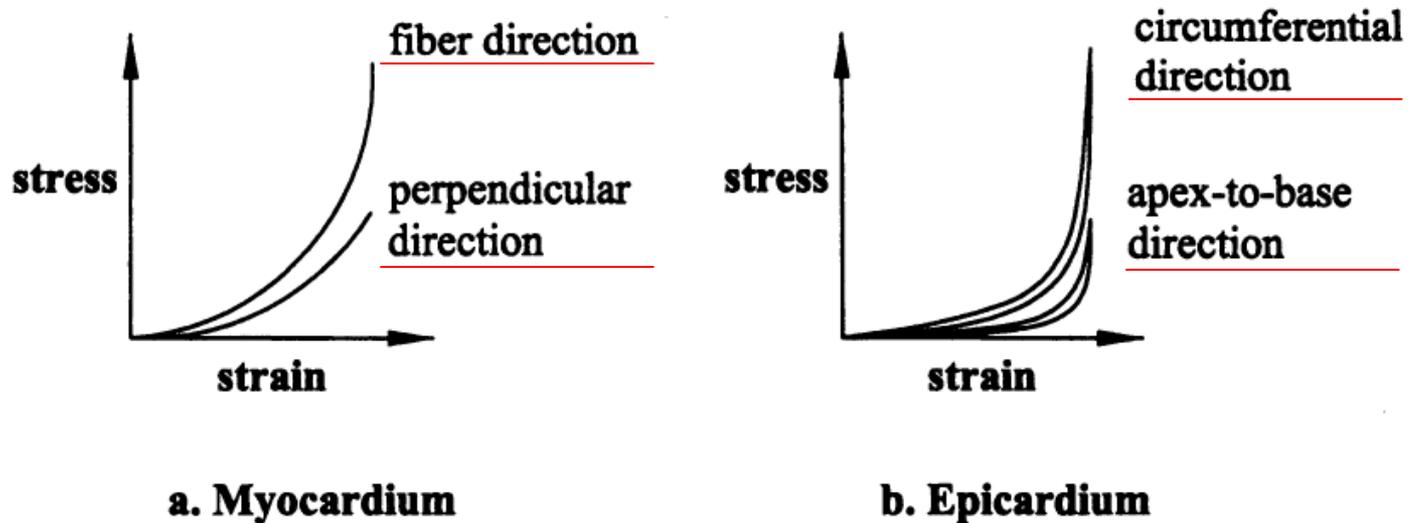


FIGURE 2.24 Schema of typical stress–strain data from a thin slab of noncontracting myocardium and associated epicardium. Both exhibit nonlinear anisotropic behaviors over finite strains, but the epicardium is more strongly nonlinear because of the initially very compliant behavior that is thought to arise due to the highly undulated collagen (cf. Fig. 1.8) in the unloaded state. Also shown is the slight hysteresis exhibited by the primarily collagenous epicardium; muscle tends to exhibit greater hysteresis (not shown).

Os eixos **circunferencial (CIRC)** e **longitudinal (LONG)** são indicados

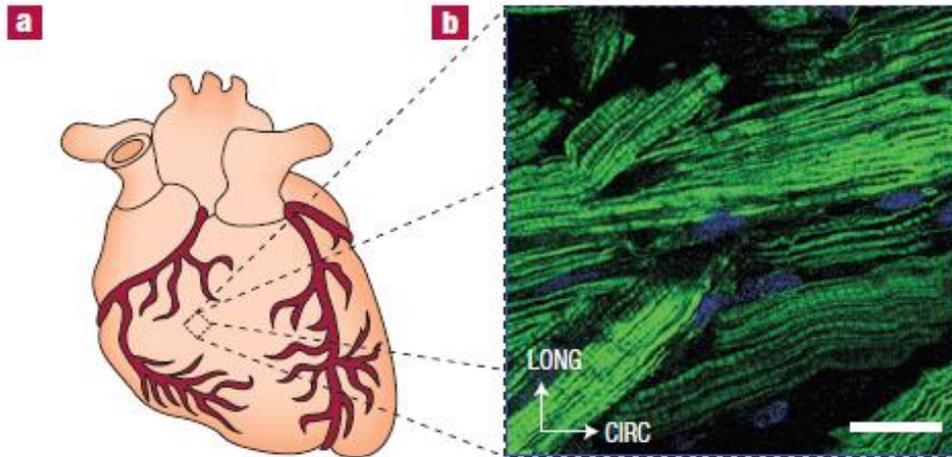
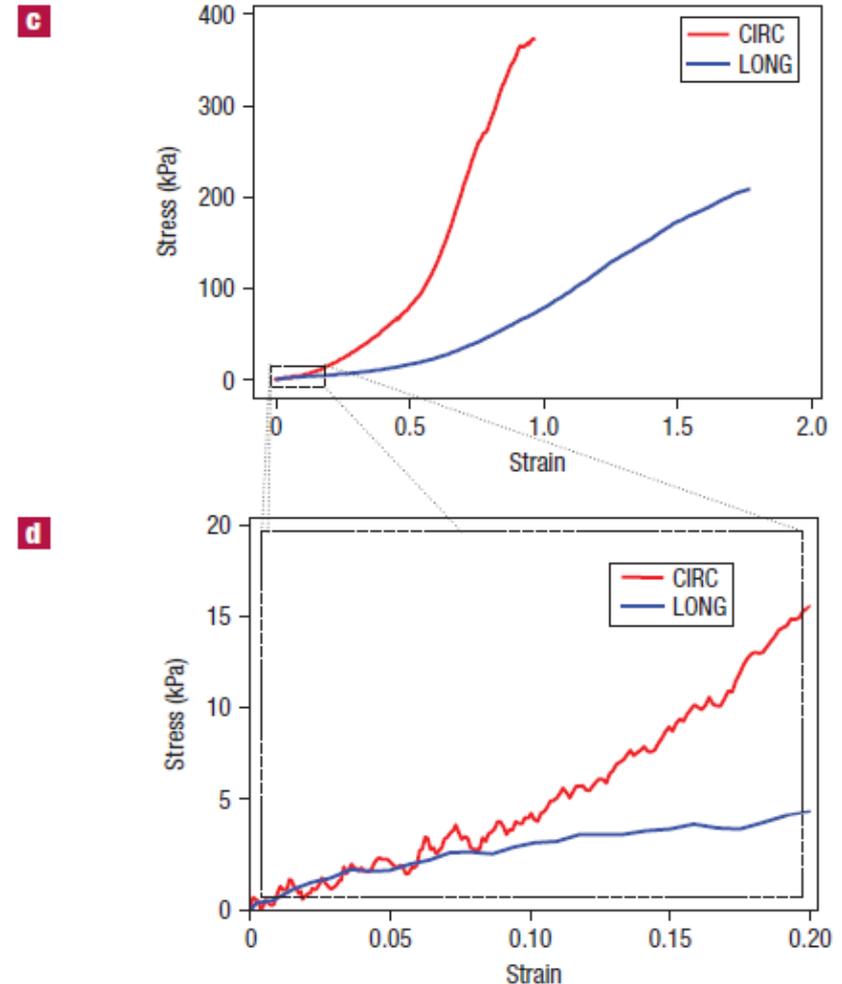


Figure 1 Structural and mechanical aspects of cardiac anisotropy. Ventricular myocardium has long been recognized as an anisotropic tissue, with tensile mechanical properties dictated by cardiac muscle fibre orientation. **a**, A schematic diagram illustrating the gross macroscopic appearance of a four-chamber mammalian heart. **b**, A full-thickness specimen of adult rat right ventricular myocardium showing preferentially oriented cardiac muscle fibres, fluorescently labelled for F-actin and cell nuclei and imaged from the epicardial surface by confocal microscopy. Scale bar: 50 μm ; anatomically defined circumferential (CIRC) and longitudinal (LONG) axes are indicated. **c,d**, Representative uniaxial tensile stress–strain plots for circumferential and longitudinal specimens of full-thickness right ventricular myocardium demonstrated anisotropic mechanical properties consistent with observed cell orientations (**c**: full range to demonstrate failure properties; **d**: physiologic regime^{19–21}). Collectively, these structural, mechanical and associated electrical properties comprise the interrelated aspects of cardiac anisotropy.



Plasticidade

- Deformação plástica é quando o material submetido a uma determinada tensão se **deforma permanentemente, mantendo a deformação mesmo quando o carregamento é retirado.**
- Corresponde à quebra de ligações com os átomos vizinhos originais e em seguida formação de novas ligações com novos átomos vizinhos, uma vez que um grande número de átomos ou moléculas se move em relação uns aos outros.
- Com a **remoção da tensão, eles não retornam às suas posições originais, diferentemente do que acontece na deformação elástica.**

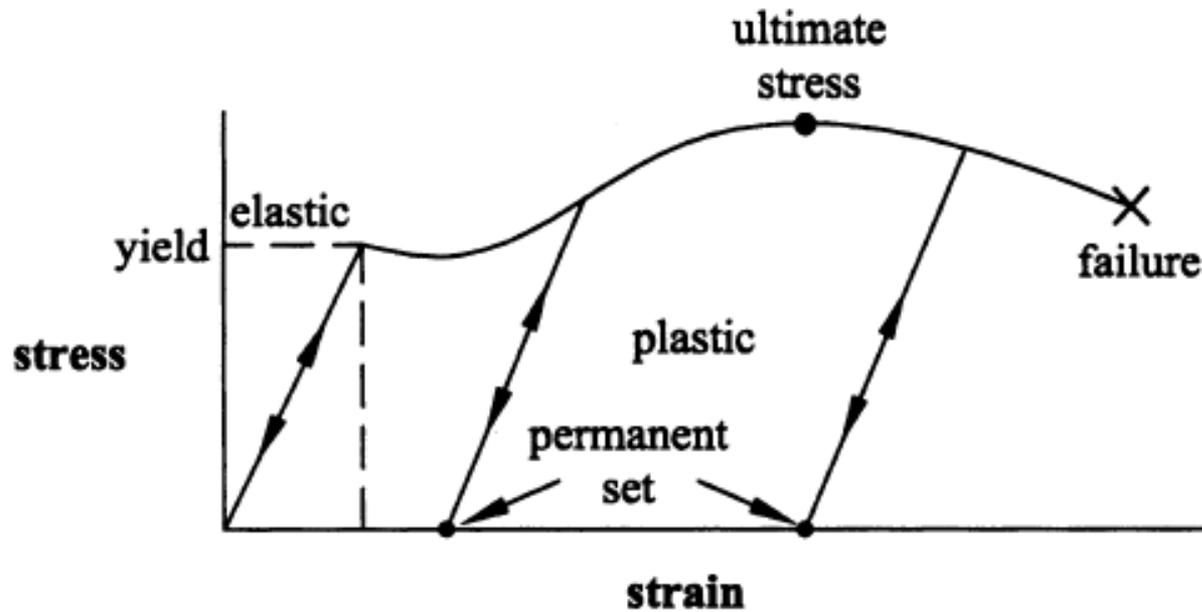


FIGURE 2.25 Schema of the stress–strain behavior of a metal that exhibits a linearly elastic response over small strains but a plastic (i.e., nonrecoverable) response thereafter. In particular, the loading and unloading curves in the plastic domain have a similar character as those in the elastic domain except that the subsequent “yield point” increases with increased plastic deformation (a so-called hardening) up to a point called the ultimate stress. Yield and failure occur due to excessive shear stresses in such ductile materials.

Linear: linear stress-strain behavior and linearized kinematics

Elastic: no dissipation and the loading/unloading curve coincide

Homogeneous: same material behavior everywhere in the material/body

Isotropic: same material response in all directions at a point

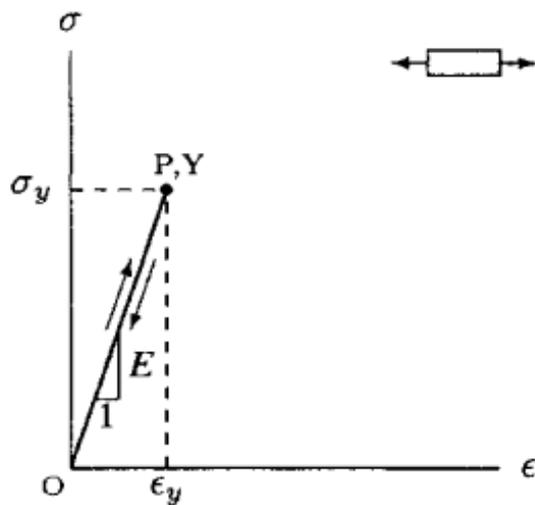


Fig. 13.14 Stress-strain diagram for a linearly elastic material (↗: loading; ↖: unloading)

Para tal material, a tensão é linearmente proporcional à deformação e a constante de proporcionalidade é chamada de módulo elástico ou **módulo de Young** do material.

Módulo de Young

$$\sigma = E \epsilon$$

Módulo de Young $\sigma = E\epsilon$

- E representa a rigidez de um material, de modo que quanto maior o módulo de Young, mais rígido é o material.

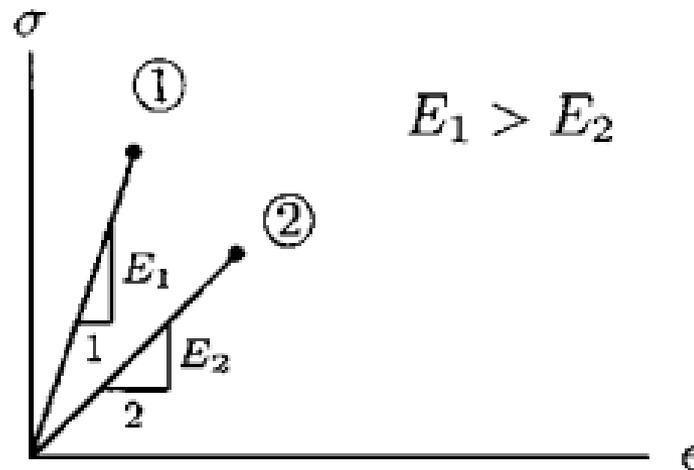
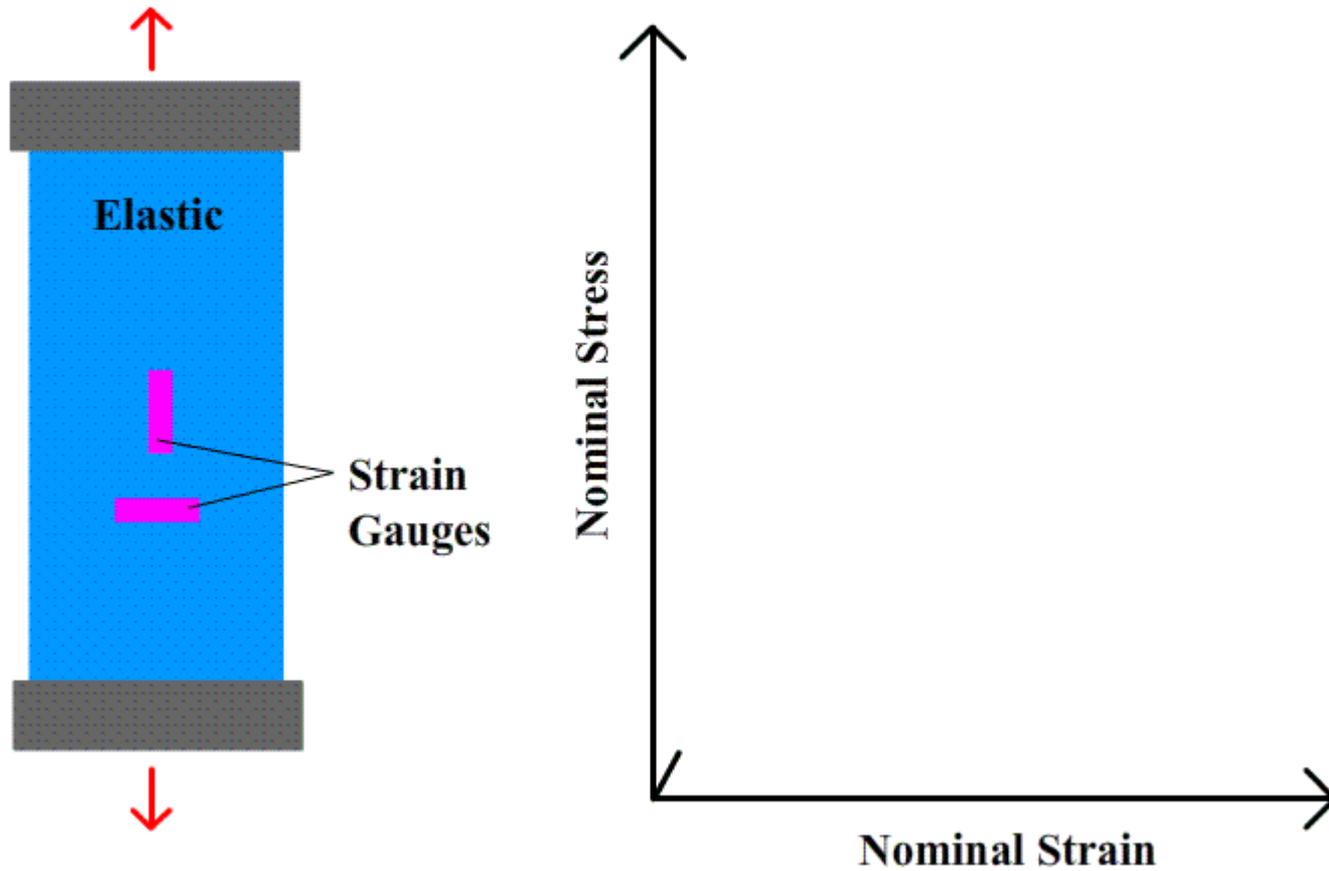
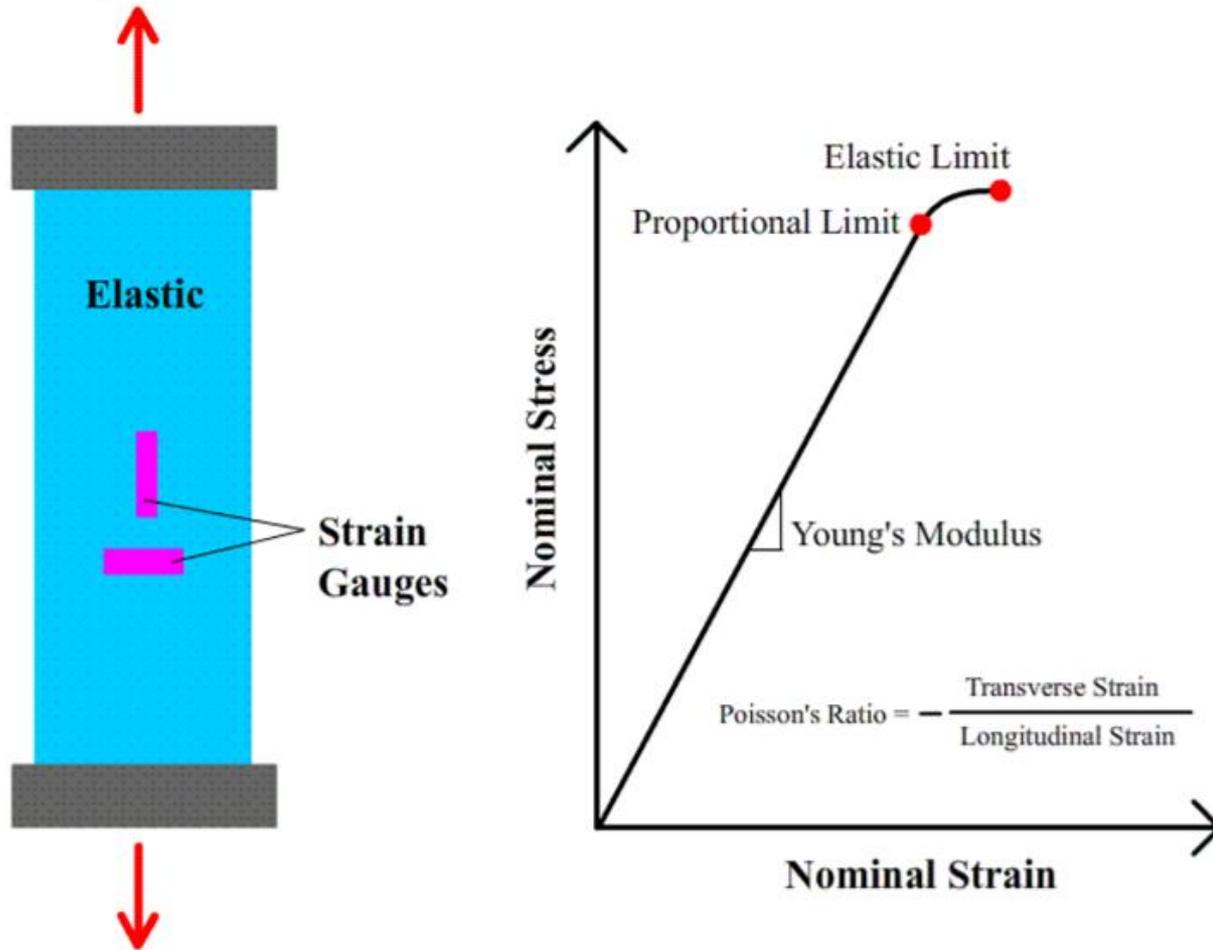


Fig. 13.24 Material 1 is stiffer than material 2

Experimental Determination of Elastic Constants

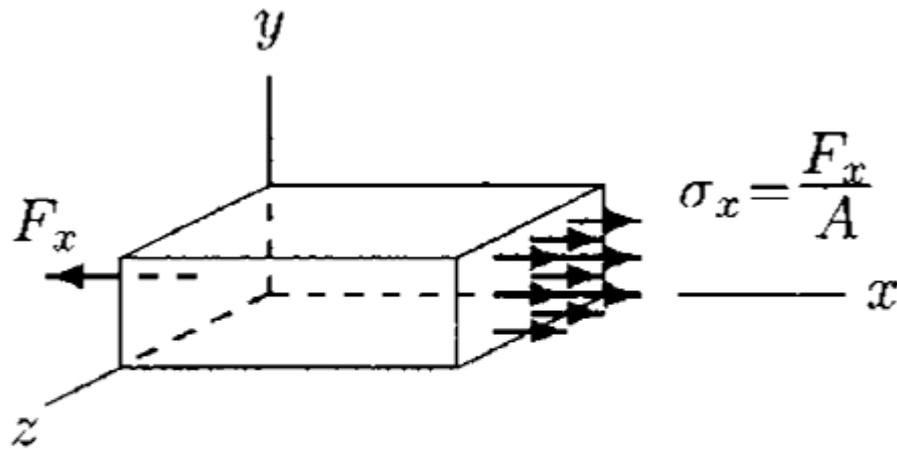


Experimental Determination of Elastic Constants



<https://civil.seu.edu.cn/mi/constants/list.htm>

Módulo de Young



$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E}$$

Fig. 14.2 *Stress distribution is uniform over the cross-sectional areas $A = ab$ of the bar*

Módulo de cisalhamento

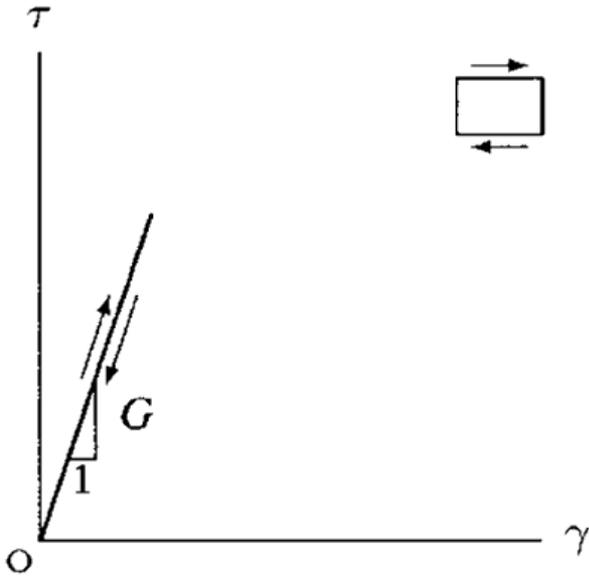


Fig. 13.16 *Shear stress versus shear strain diagram for a linearly elastic material*

- Alguns materiais podem apresentar comportamento linearmente elástico quando submetidos a forças de cisalhamento.
- A constante de proporcionalidade entre tensão e deformação de cisalhamento é chamada de **módulo de cisalhamento**, que é comumente denotado pelo **símbolo G** :

$$\tau = G\gamma$$