



ESCOLA POLITÉCNICA DA USP

Programa de Pós-Graduação

**ENGENHARIA CIVIL**

# Propriedades dos materiais

Antonio Figueiredo

Renata Monte

# Definições

- Ciência dos materiais:
  - Disciplina que envolve a investigação das **relações** existentes entre as **estruturas** e as **propriedades** dos materiais.
- Engenharia de materiais:
  - **Projeto** ou **engenharia** de um material, baseados na ciência dos materiais, para **produzir** um conjunto predeterminado de **propriedades**.

# Princípio básico:

O comportamento do material depende da microestrutura

# Estrutura dos materiais

- Forma como os componentes internos dos materiais se arranjam.
- Várias formas/níveis de estudo da estrutura do material em função do que se pretende analisar ou manipular (“engenheirar”).
- Objetivos: entender e obter **propriedades** desejadas.

# Algumas perguntas importantes:

O que é resistência à compressão do concreto?

O que é resistência à tração do concreto?

Qual é a relação entre a resistência à tração do concreto e a resistência à compressão?

Por quê?

# Perguntas fundamentais:

O que é propriedade de um material?

Resposta de um material a um estímulo externo.

Tipos: mecânicas, térmicas, elétricas, magnéticas, óticas e químicas (ligadas à reatividade ou “deteriorativas”).

# Perguntas fundamentais:

- O que é característica de um material?

Parâmetro ou atributo que caracteriza um material

- O que é processamento de um material?
- O que é desempenho de um material?

# Como você definiria desempenho (performance)?

**VW Golf 1.0 TSI**



**Ford Fiesta 1.0 EcoBoost**



<http://quatorrodas.abril.com.br/testes/comparativo-ford-fiesta-1-0-ecoboost-x-vw-golf-1-0-tsi/>

# Como comparar desempenho?

<b>Teste de pista (com gasolina)</b>	<b>Golf 1.0 TSI</b>	<b>Fiesta 1.0 EcoBoost</b>
<b>Aceleração de 0 a 100 km/h</b>	10,4 s	9,5 s
<b>Aceleração de 0 a 1000 m</b>	31,8 s – 164,6 km/h	31,0 s – 170 km/h
<b>Retomada de 40 a 80 km/h</b>	5,6 s (em 3ª)	3,9 s (em D)
<b>Retomada de 60 a 100 km/h</b>	7,7 s (em 4ª)	4,8 s (em D)
<b>Retomada de 80 a 120 km/h</b>	10,3 s (em 5ª)	6,5 (em D)
<b>Frenagens de 60 / 80 / 120 km/h a 0</b>	15,1 / 26,3 / 59,8 m	17 / 27,8 / 65,8 m
<b>Consumo urbano</b>	12,9 km/l	12,5 km/l
<b>Consumo rodoviário</b>	17,8 km/l	16,1 km/l

# Definição de desempenho

- A borracha do pneu do automóvel, por si só, não tem desempenho.
- O desempenho é do automóvel ou do componente (sistema).
- O material de construção, por si só, não tem desempenho.
- O desempenho é da edificação ou da obra de infraestrutura ou do sistema (elemento).
- **Bom desempenho é adequação às necessidades dos usuários.**

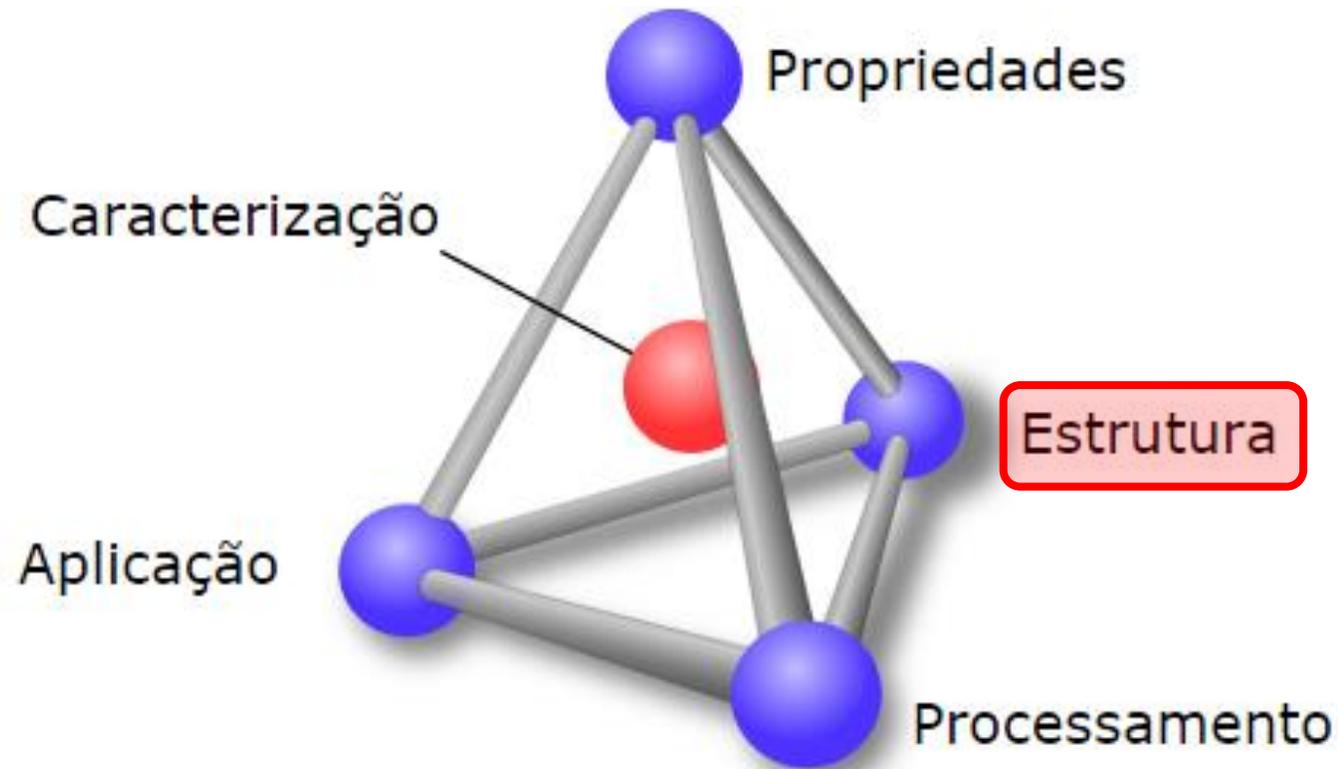
# Perguntas fundamentais:

1. O que é distância interatômica?
2. Defina: molécula e estrutura molecular.
3. 3. A energia de ligação C-C, típica dos materiais poliméricos como é o caso do polietileno de alta densidade (PEAD) é de  $345 \text{ kJ mol}^{-1}$ . Já a ligação Al-Al é um pouco menor:  $324 \text{ kJ mol}^{-1}$ . Por que, então, o ponto de fusão do alumínio é de  $660^\circ\text{C}$  e o do PEAD é de  $137^\circ\text{C}$ ?

# Perguntas fundamentais:

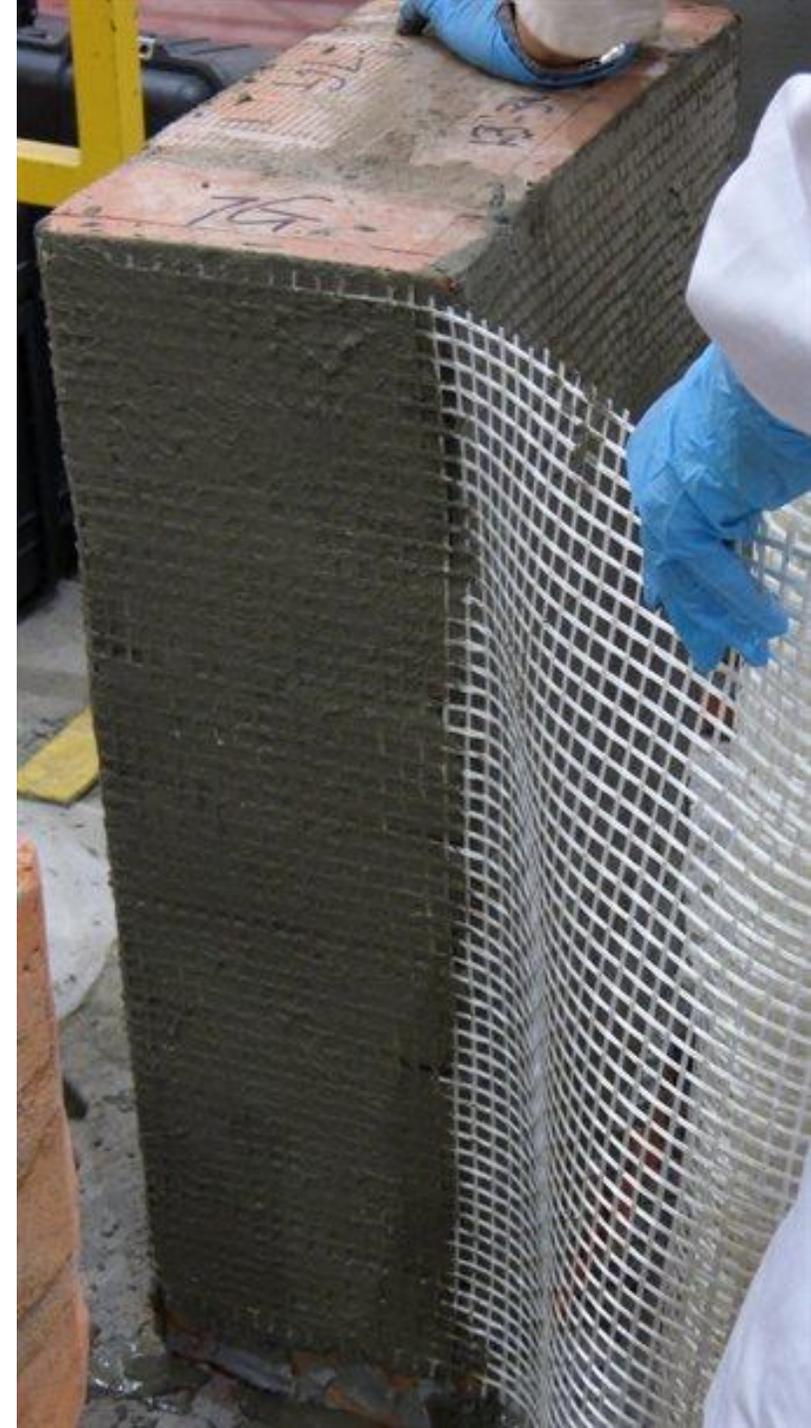
4. Por que é mais difícil encontrar um material cristalino formado por ligações covalentes?
5. Qual é a diferença entre material dúctil e frágil pelo ponto de vista da engenharia? Por que não é interessante medir resistência à compressão de materiais dúcteis?
6. Por que materiais com maior ocorrência de defeitos cristalinos apresentam menor limite elástico?

# O Tetraedro das Ciências dos Materiais



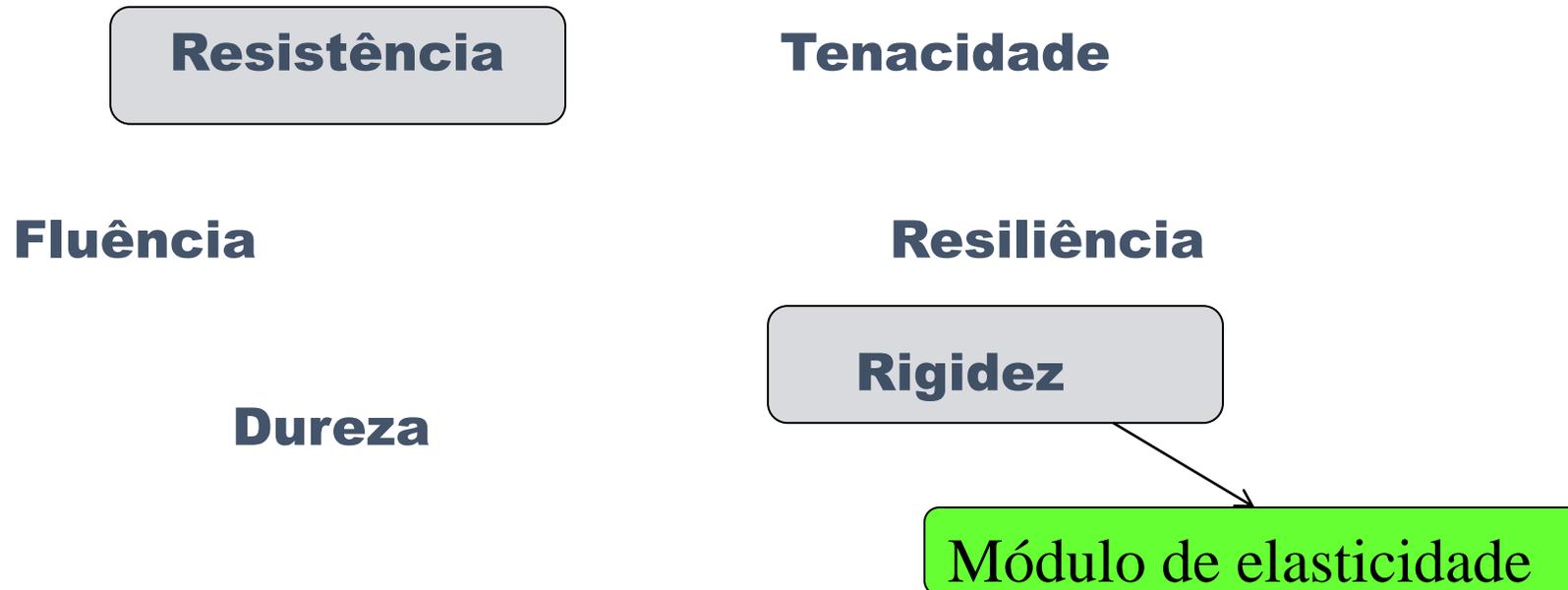
# Confinement of Masonry Columns with Textile-Reinforced Mortar (TRM) Jackets

- Thin (up to 10 mm) jacket with non-corrosive high-strength fibers (i.e. carbon, AR-glass or basalt)
- **PhD Student:** Dionysios Bournas
- **Supervisor:** Dr Koutas Lampros
- University of Nottingham



# Objetivo principal desta aula:

- Apresentar as principais propriedades **mecânicas** dos materiais de construção civil.



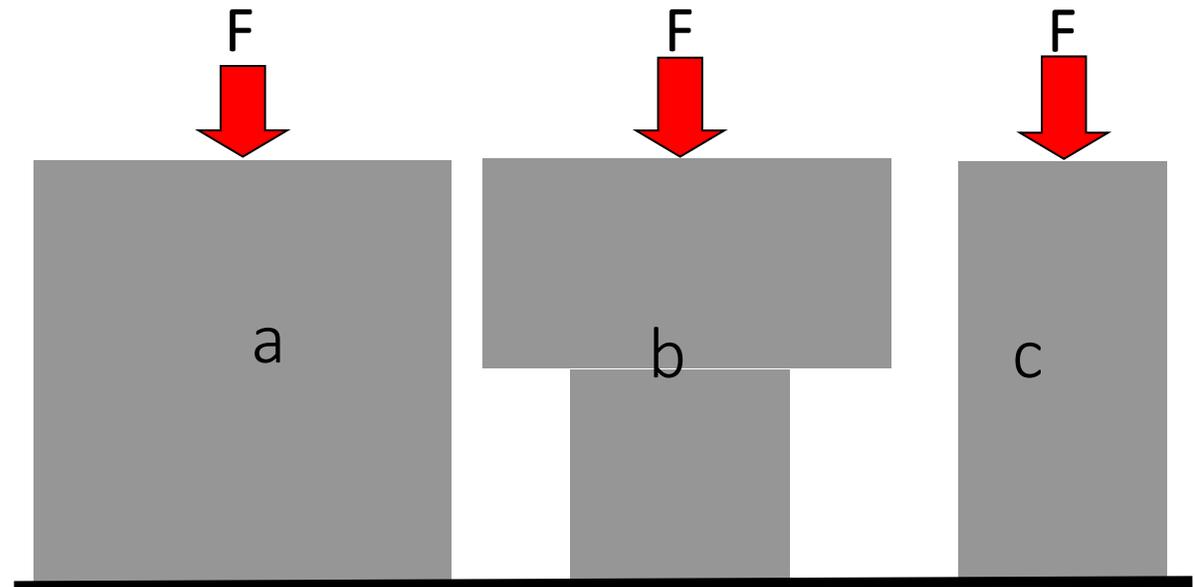
# Tensão

É a relação entre a carga aplicada e a área resistente.

$$\sigma = \frac{F}{A_{resistente}}$$

É expressa em

- $\text{N/m}^2 = \text{Pa}$ ,
- $\text{MPa} = \text{N/mm}^2$ .

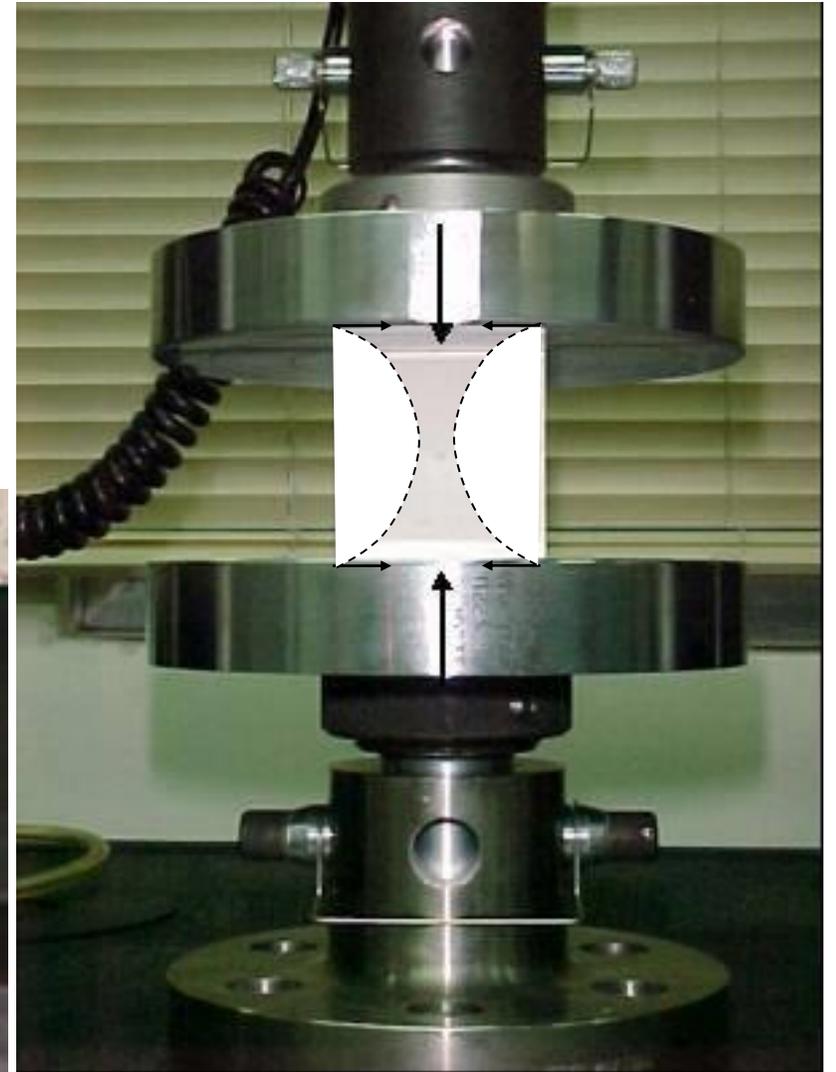


# Compressão

- Resistência à compressão

$$f_c = \frac{P_{rup}}{A}$$

- Influência
  - da forma do cp
  - velocidade de carregamento
  - temperatura
  - umidade

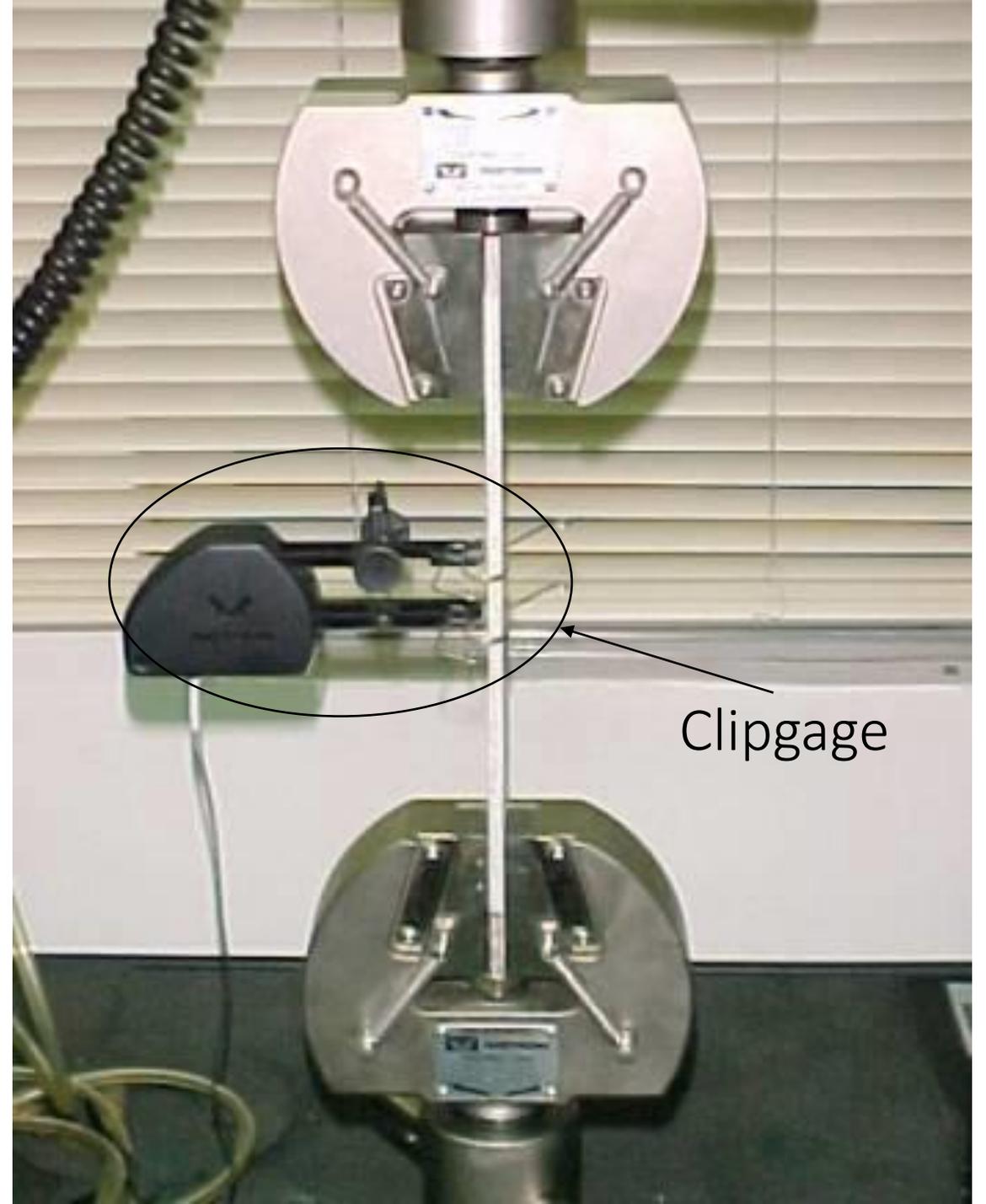


# Tração direta

- Resistência à tração

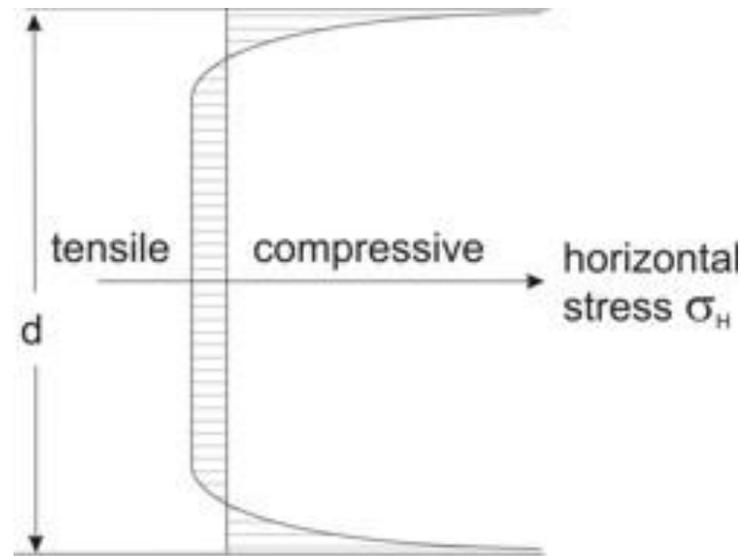
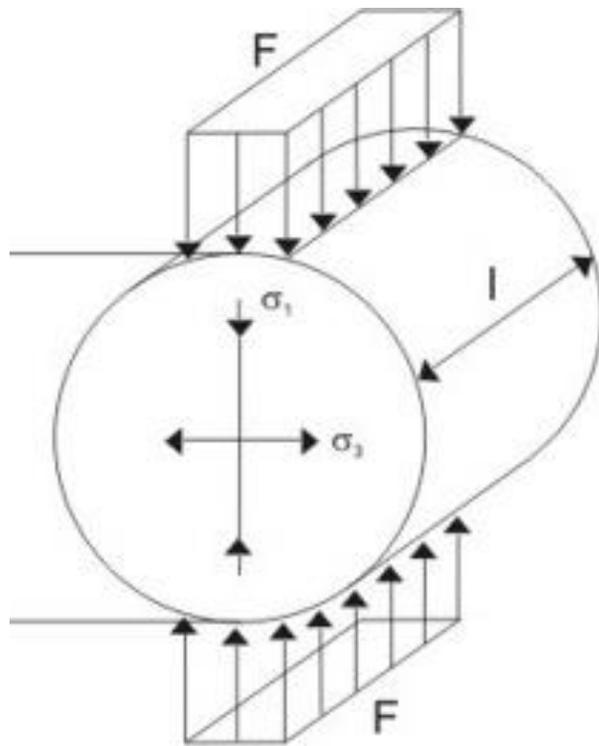
$$f_t = \frac{P_{rup}}{A}$$

- Sistema de garras
- Forma do corpo-de-prova
- Medidor de deformação

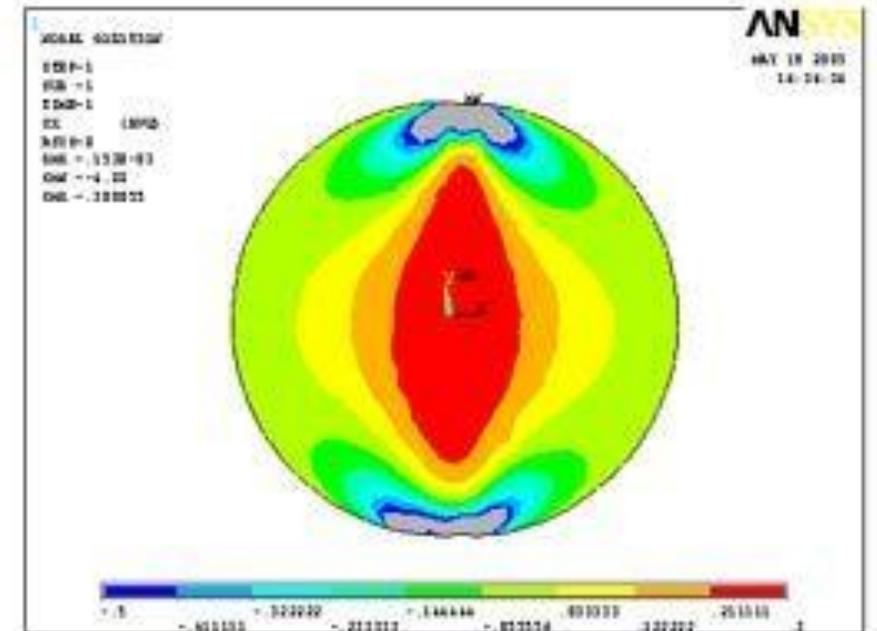


# Ensaio brasileiro

$$\sigma_t = \frac{2F}{\pi dl}$$



$d$  - diameter of the sample

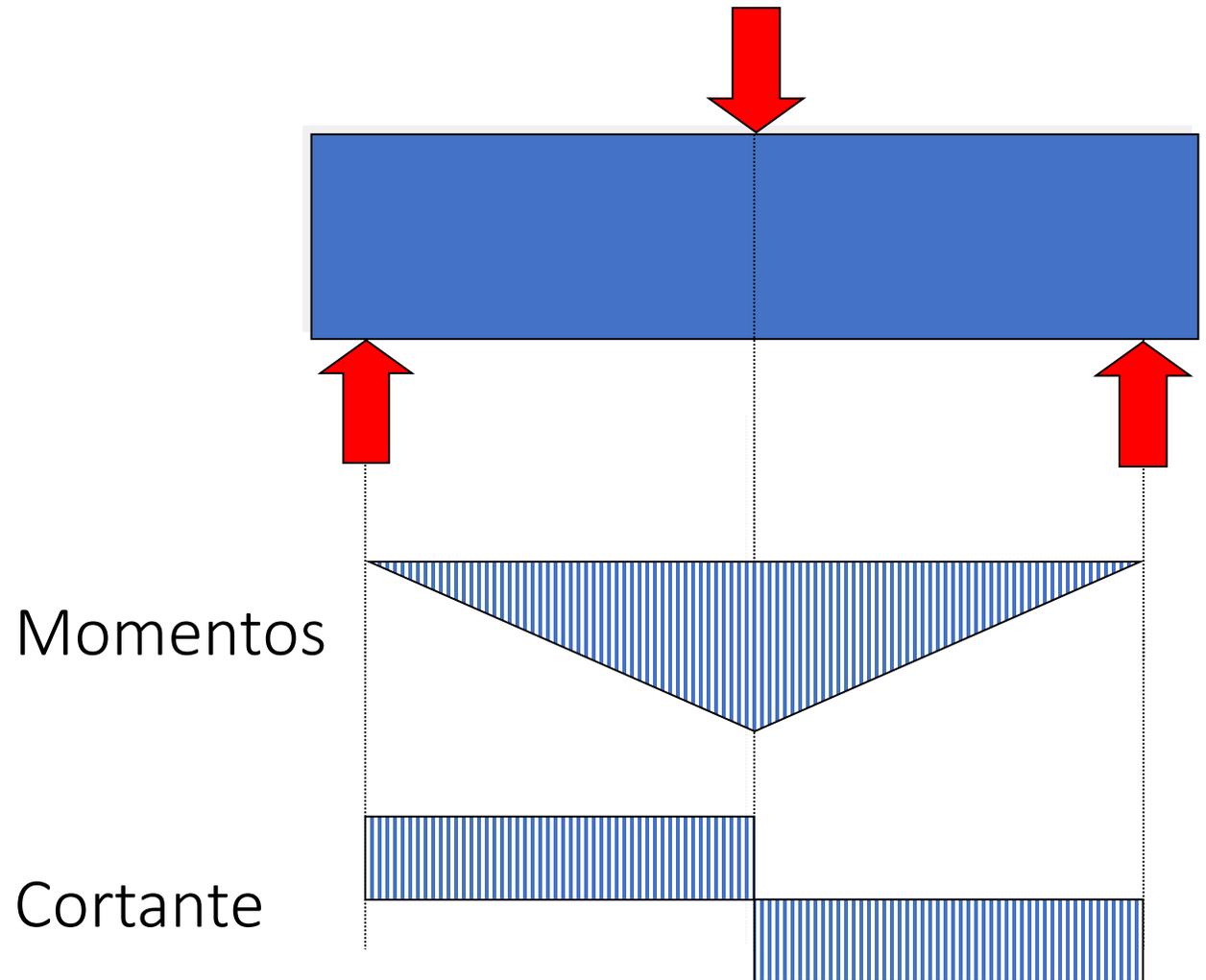


FEM Simulation of a Brazilian Disk Test

# Resistência à Tração na flexão

- Assume elasticidade linear
  - Módulo de ruptura
- Três pontos

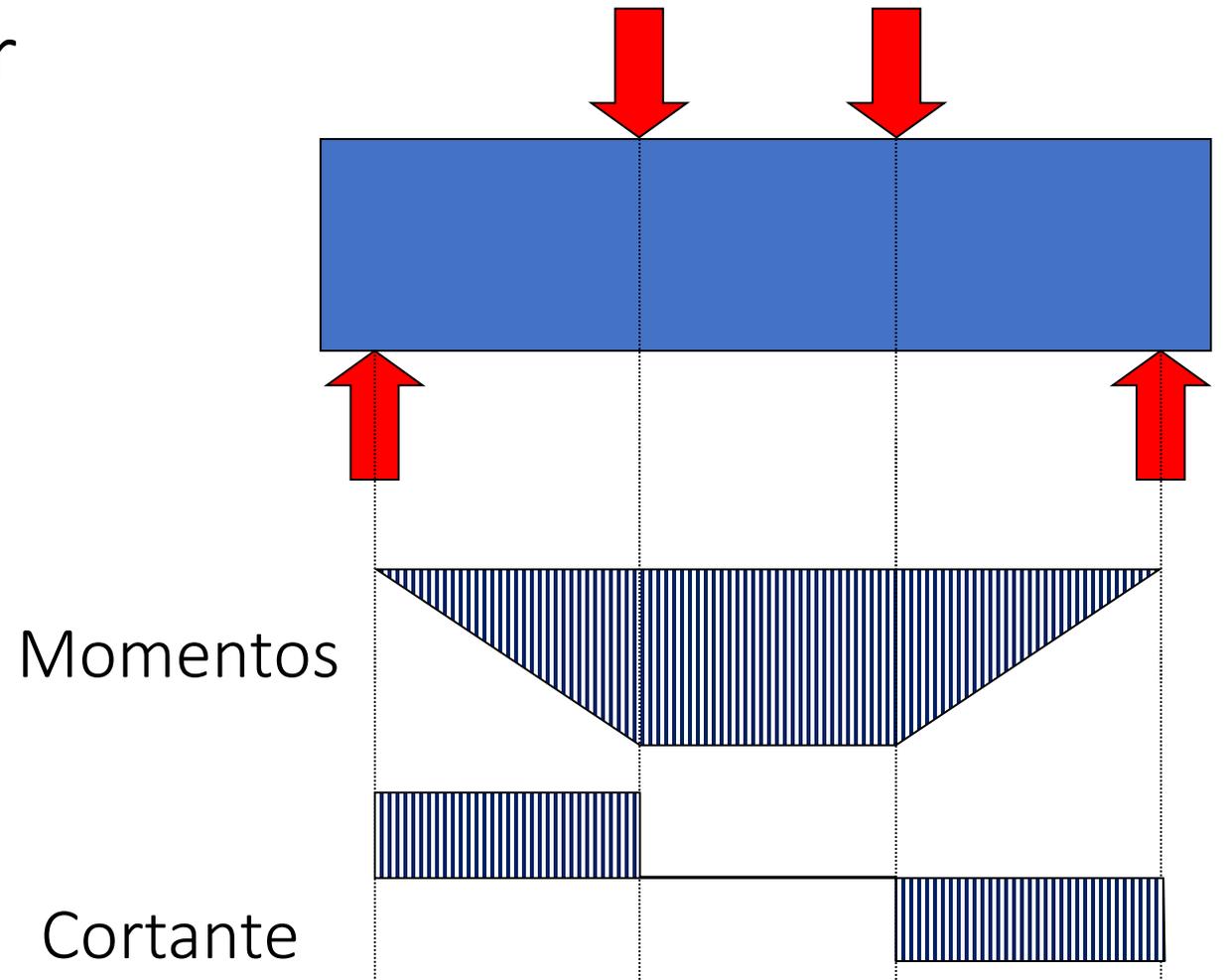
$$MOR = \frac{3}{2} x \frac{PL}{be^2}$$



# Resistência à Tração na flexão

- Assume elasticidade linear
  - Módulo de ruptura
- Quatro pontos

$$MOR = \frac{PL}{be^2}$$



# Resistência à Tração na flexão

- Assume elasticidade linear
  - A resistência à tração é definida pelo termo Módulo de ruptura
- Quatro pontos

$$MOR = \frac{PL}{be^2}$$

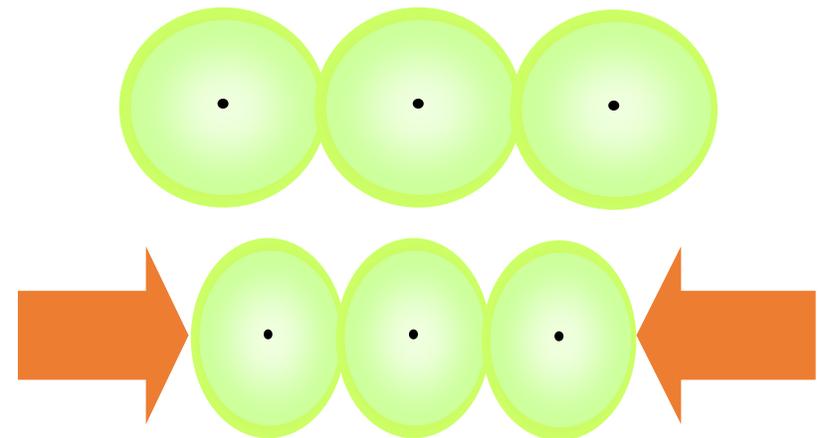
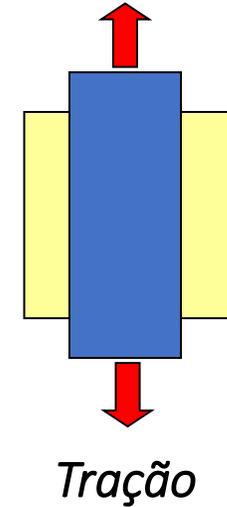
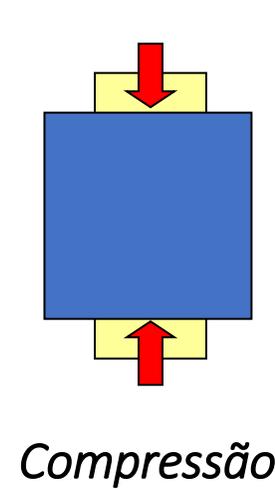
$$E = \frac{23L^3}{1296I} \frac{P}{\delta}$$



LVDT: mede a flecha no meio do vão

# Deformação elástica

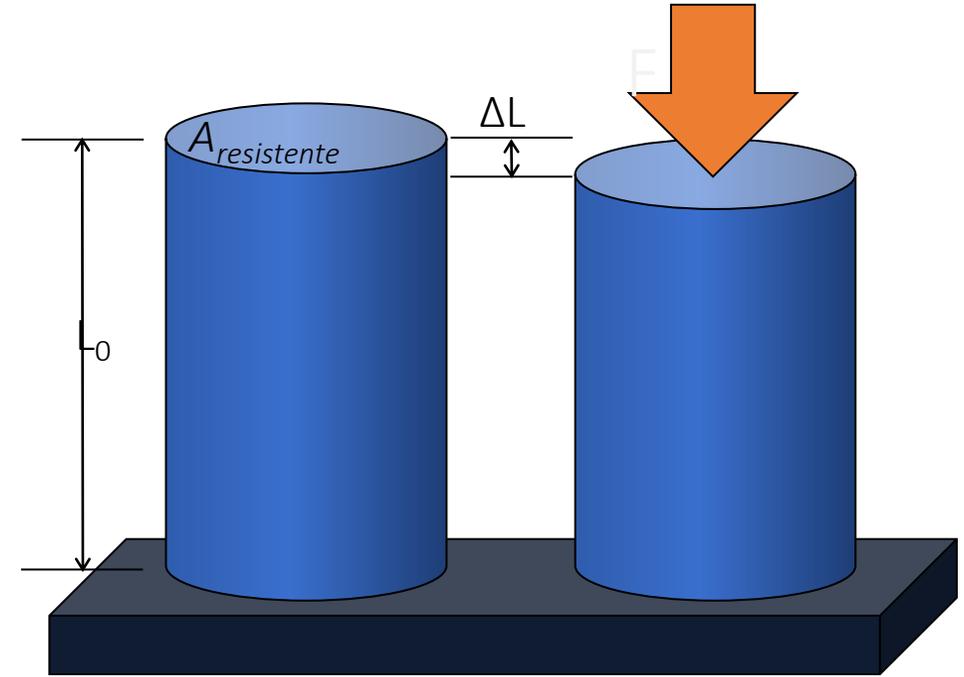
- Instantânea
- Reversível
  - Volta às dimensões originais quando retira a carga
- Variação de volume
- Linear ou não linear



# Deformação específica

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

(L/L) m/m, mm/mm

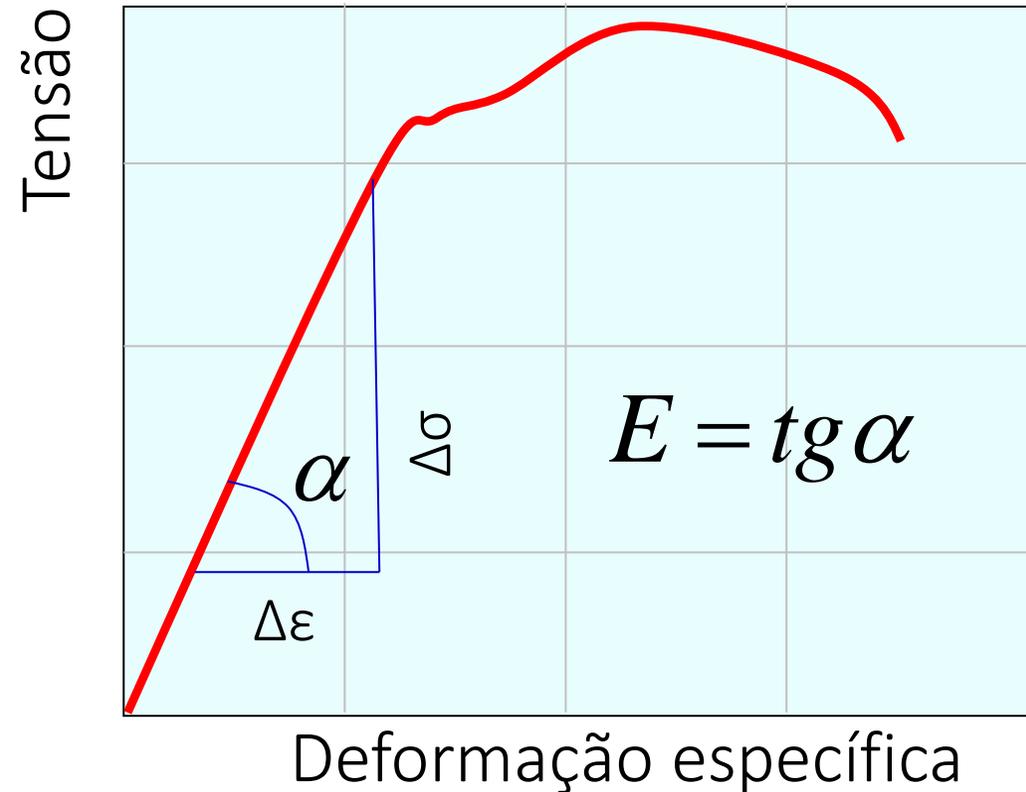


# Módulo de elasticidade ou Módulo de Young

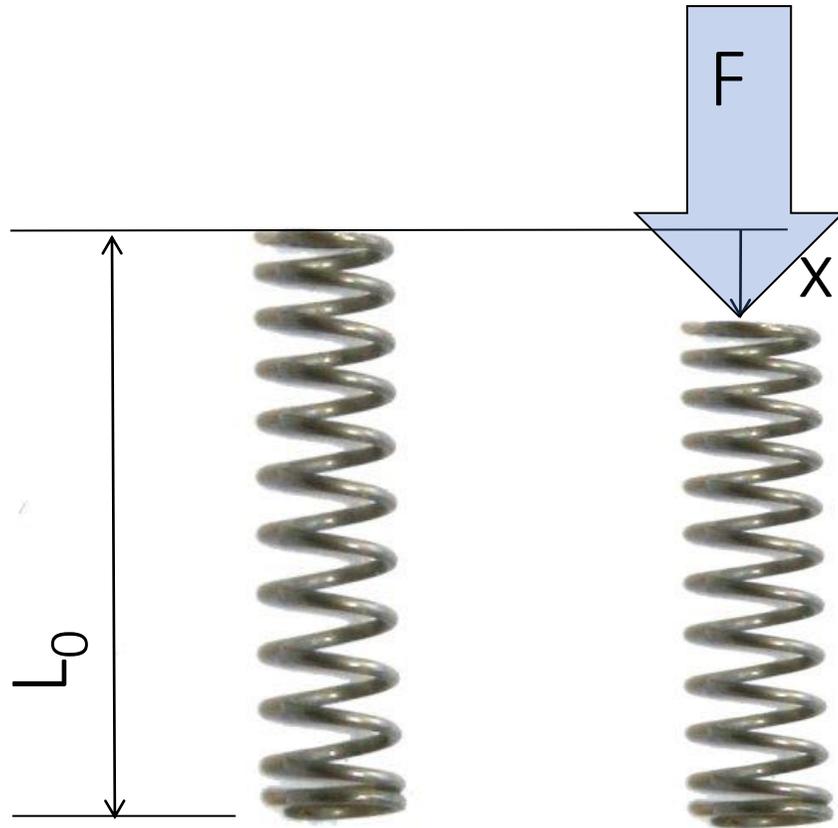
- Lei de Hook:  
Deformação é proporcional a tensão (elasticidade linear)

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$$

Deformação específica  
Independente do comprimento de medida



# Módulo de elasticidade

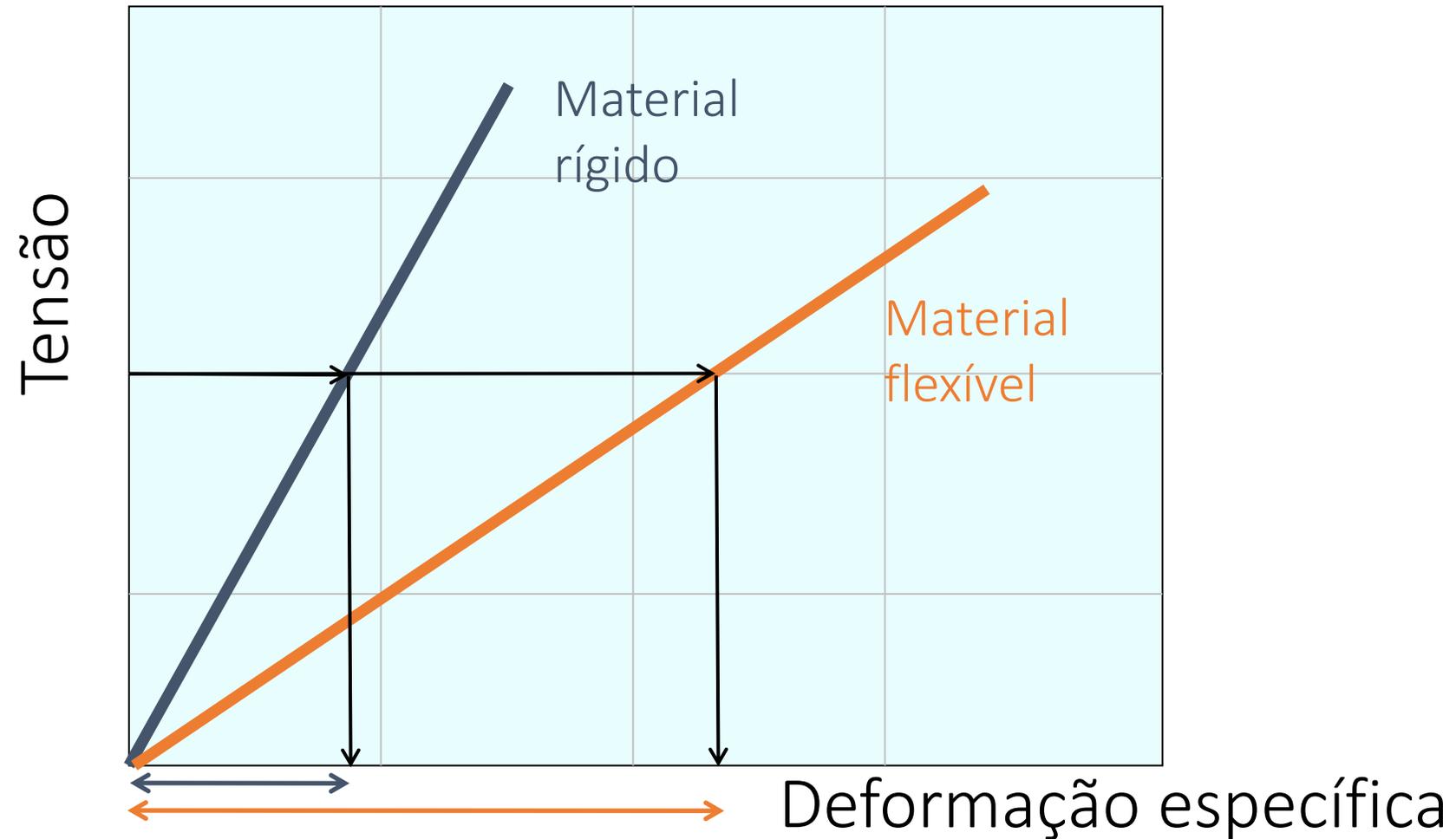


$$\frac{F}{A} = k \cdot \frac{x}{L_0}$$

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

# Módulo de elasticidade

(exemplos)



# Módulo de elasticidade

(exemplos)

Material	Módulo de elasticidade (GPa)
<b>Concreto</b>	<b>15 - 40</b>
<b>Aço</b>	<b>210</b>
<b>Alumínio</b>	<b>70</b>
<b>Fibras de carbono</b>	<b>200 – 450</b>
<b>Borracha</b>	<b>0,001 – 0,02</b>

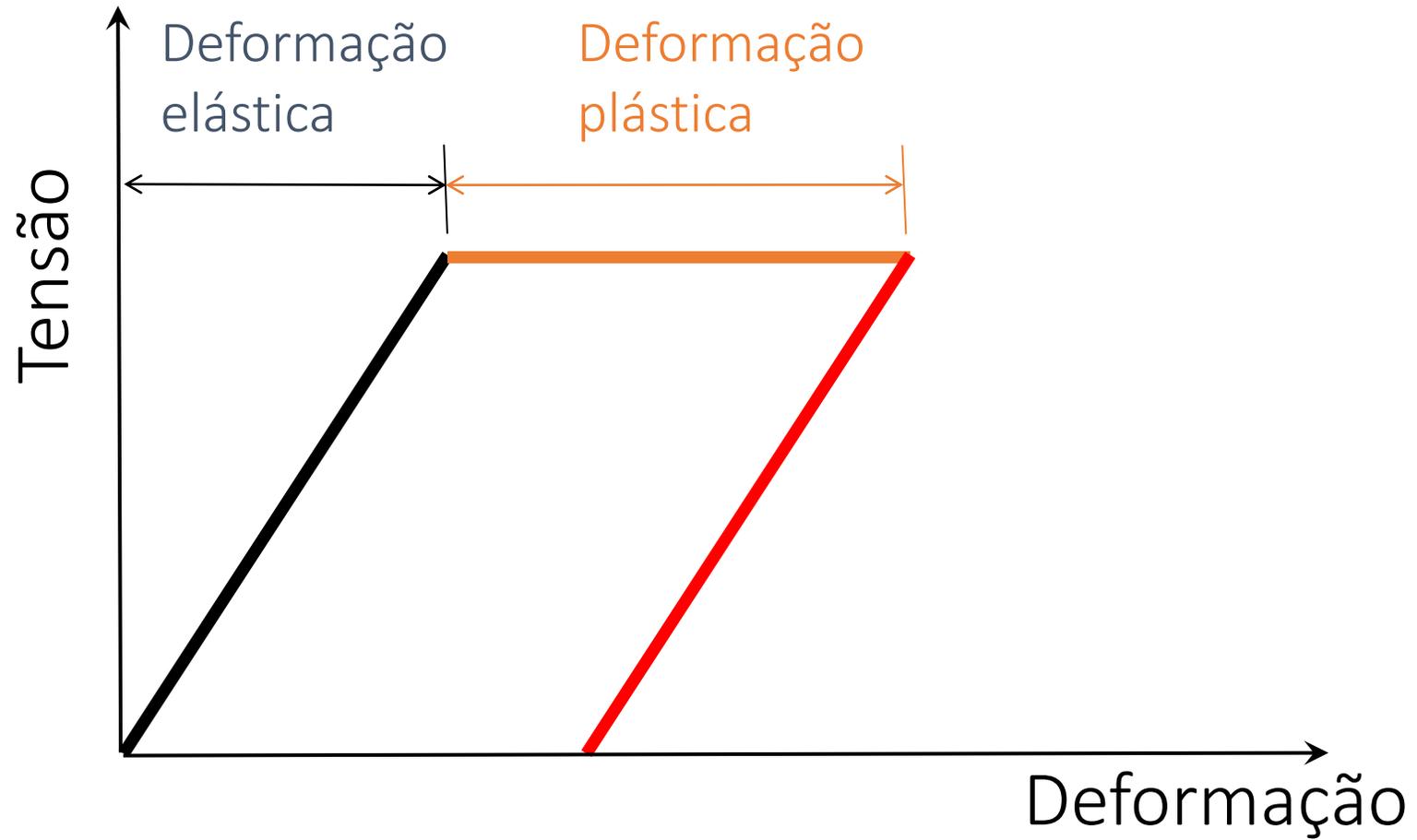
Fonte: TAYLOR, GD (1991).

# Deformação plástica

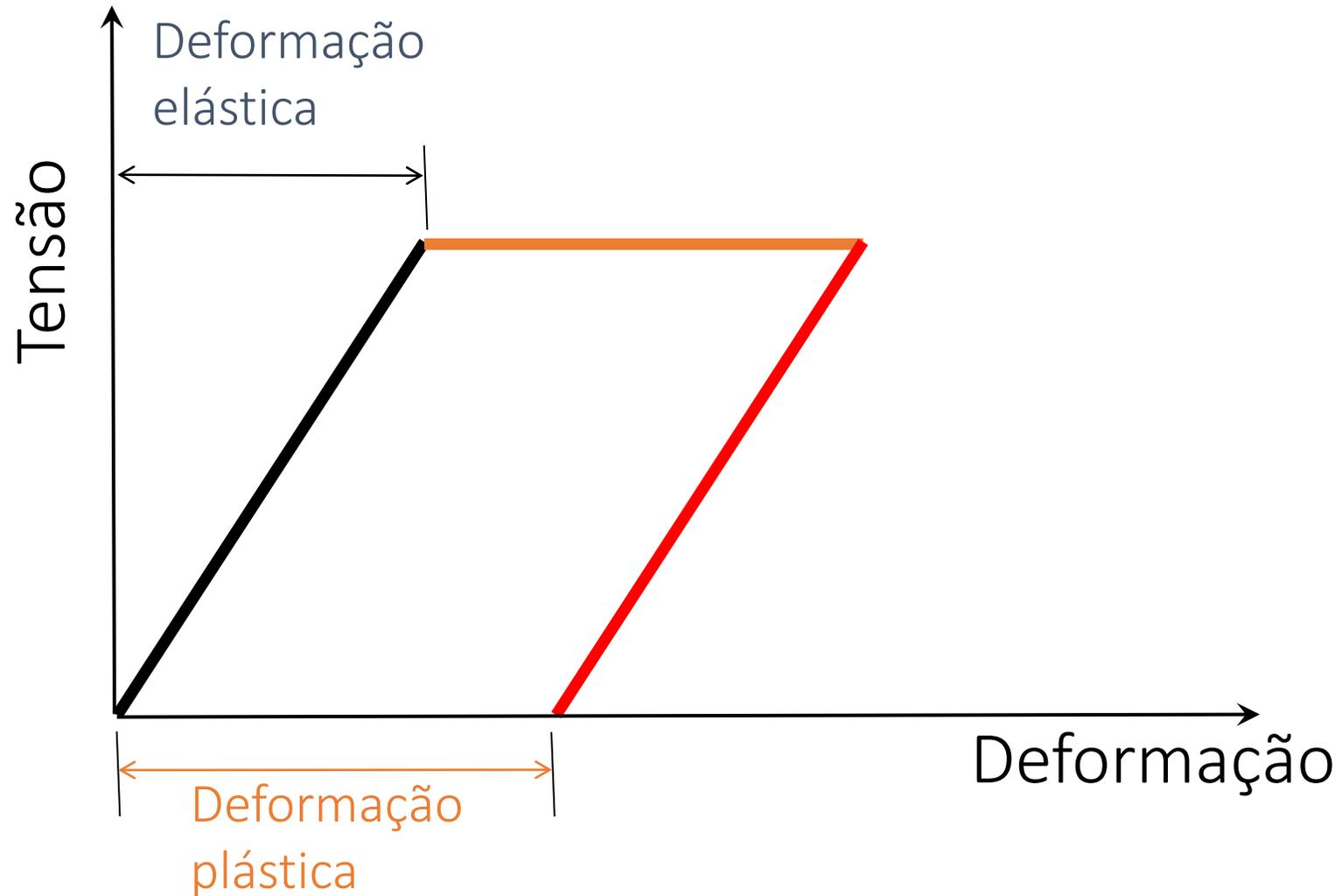
- Pode ocorrer acima de determinado nível de tensão
- Instantânea e
- Irreversível
- Sem mudança de volume



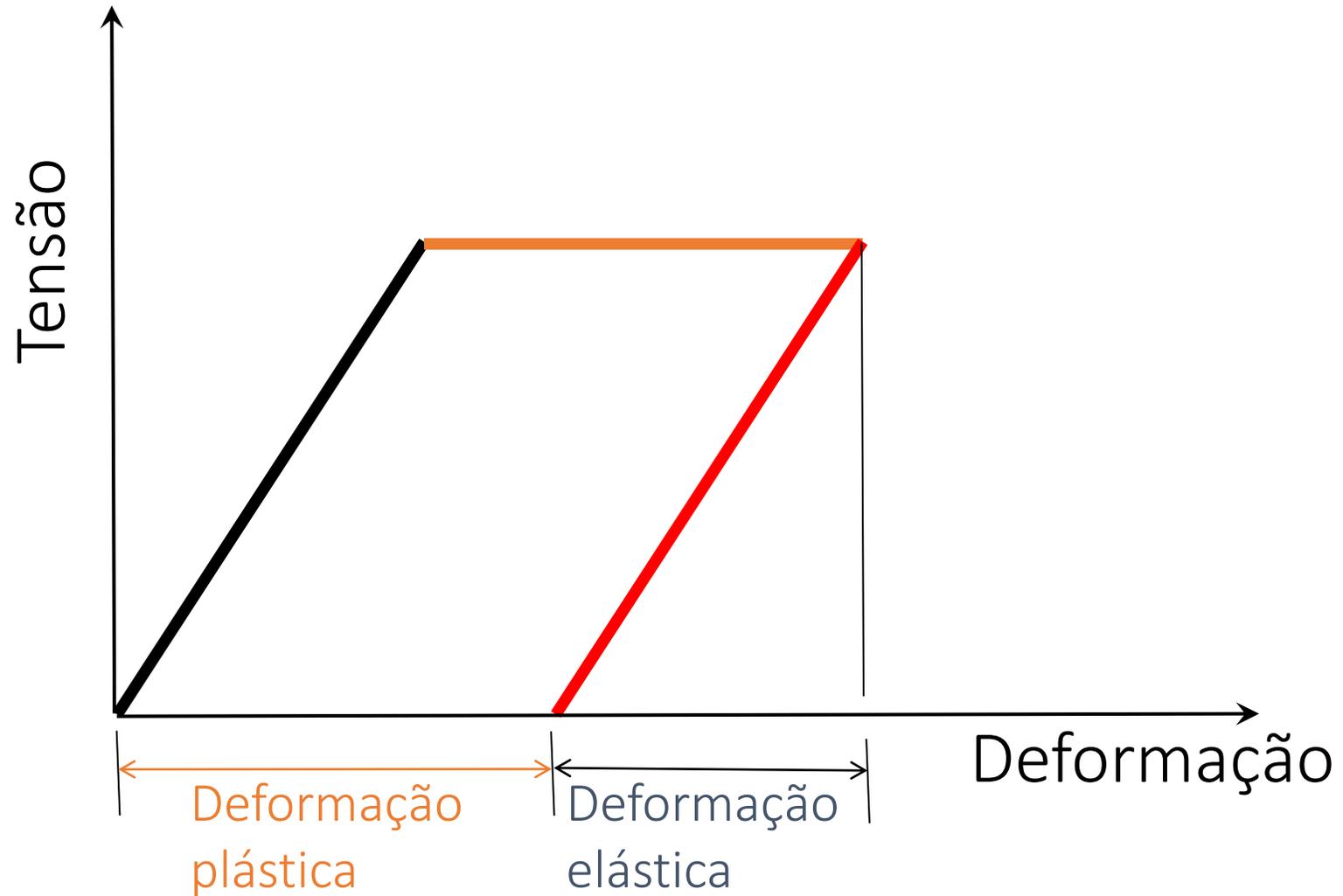
# Deformação plástica



# Deformação plástica

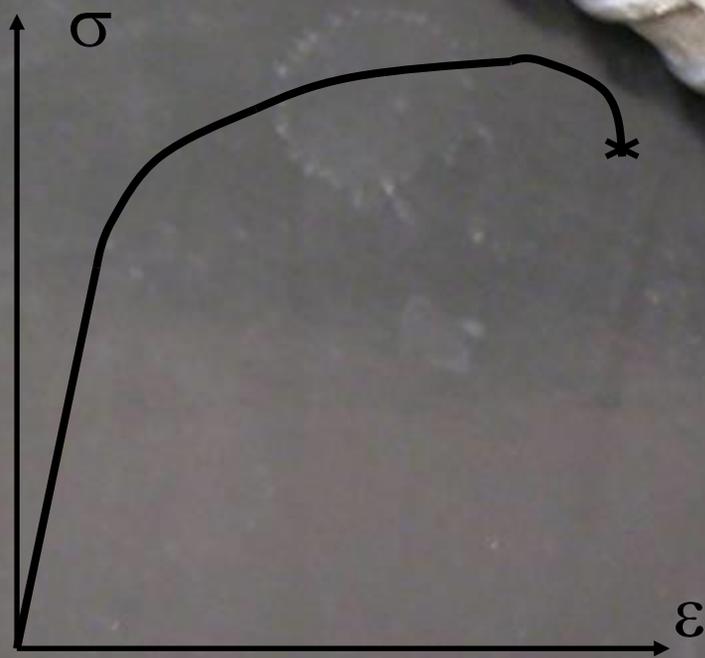


# Deformação plástica



# Comportamento mecânico dos materiais dúcteis (metais)

Material elasto-plástico

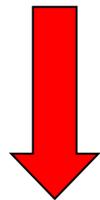


Ensaio de tração direta

# Formas de ruptura

- Ruptura frágil

Ocorre sem que o material apresente deformações plásticas significativas



Ruptura catastrófica  
(sem aviso)

- Ruptura dúctil

Ocorre com o material apresentando deformações plásticas



Ruptura precedida  
de grandes  
deformações visíveis

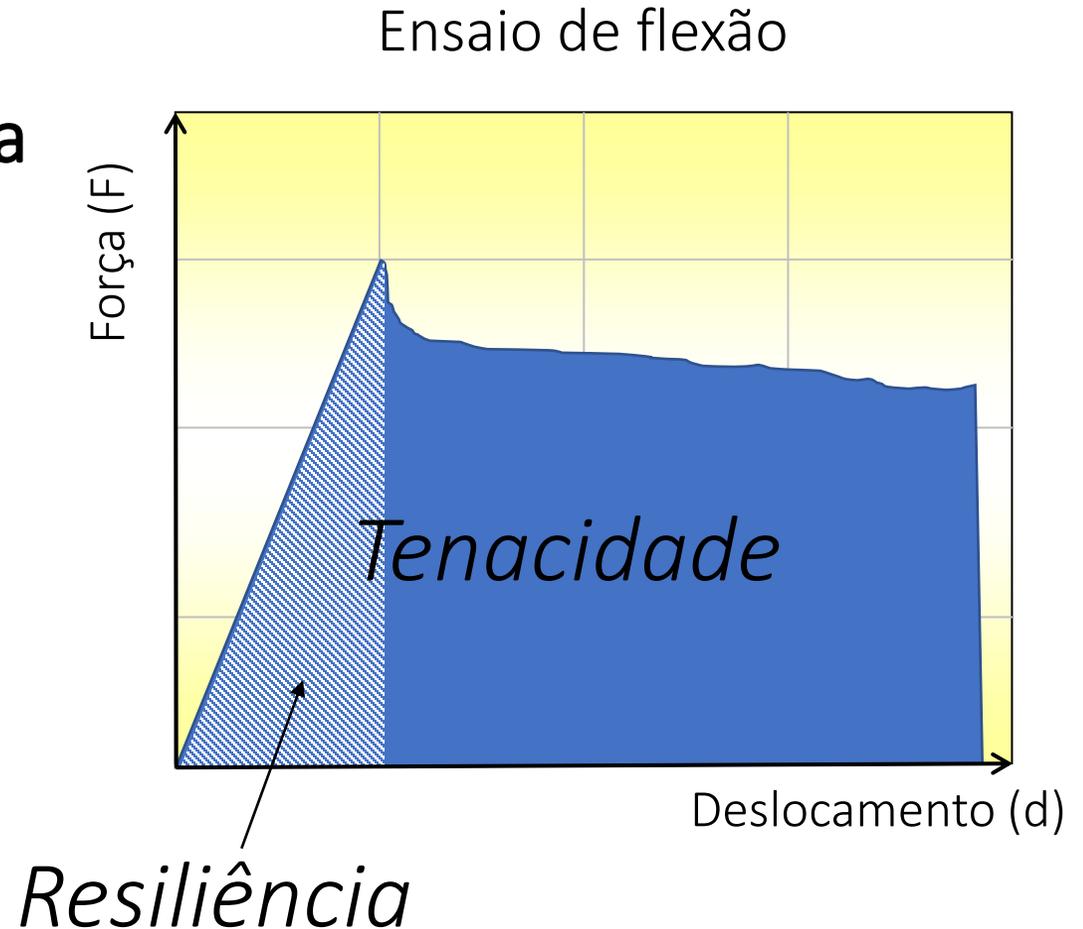
Is this duck tile ductile?



# Energias de ruptura

- Tenacidade
  - Energia despendida até sua ruptura
- Resiliência
  - Energia absorvida até seu limite elástico
- Conceito de trabalho

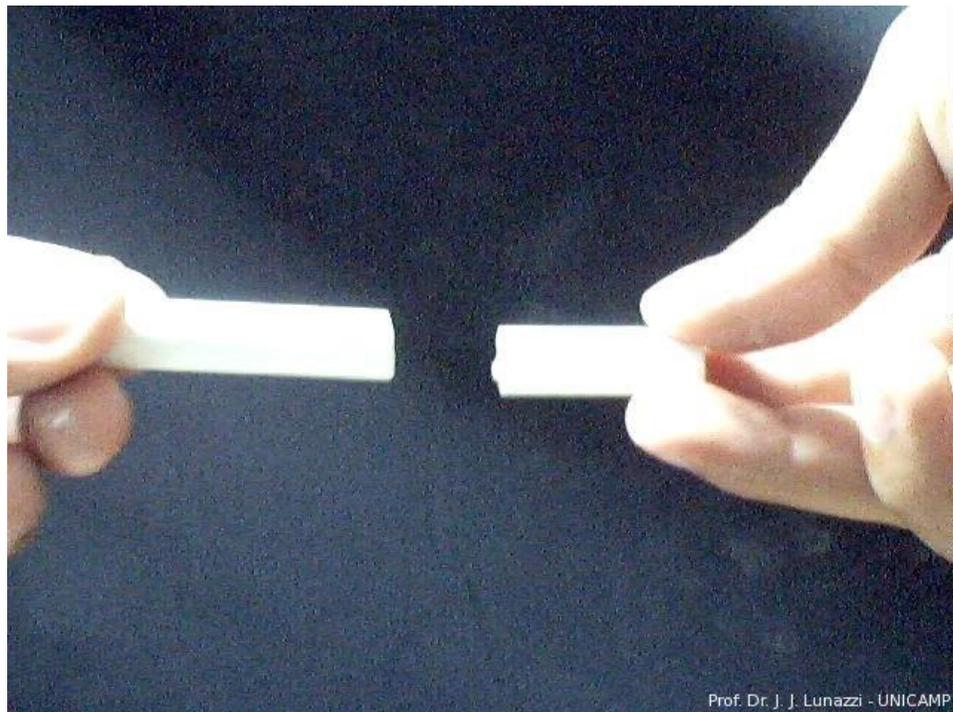
$$\tau = F \cdot d$$



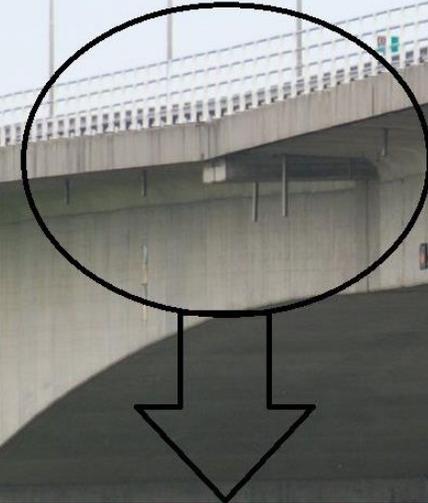
# Formas de ruptura

- Material frágil
  - Material totalmente frágil: apenas deformações elásticas antes da ruptura.
  - Frequentemente: pouca ou nenhuma deformação plástica antes da ruptura
  - Pouca dissipação de energia
  - Baixa resistência à impactos
- Material dúctil
  - Grande deformação plástica antes da ruptura
  - Grande dissipação de energia
  - Alta resistência à impactos

# Formas de ruptura



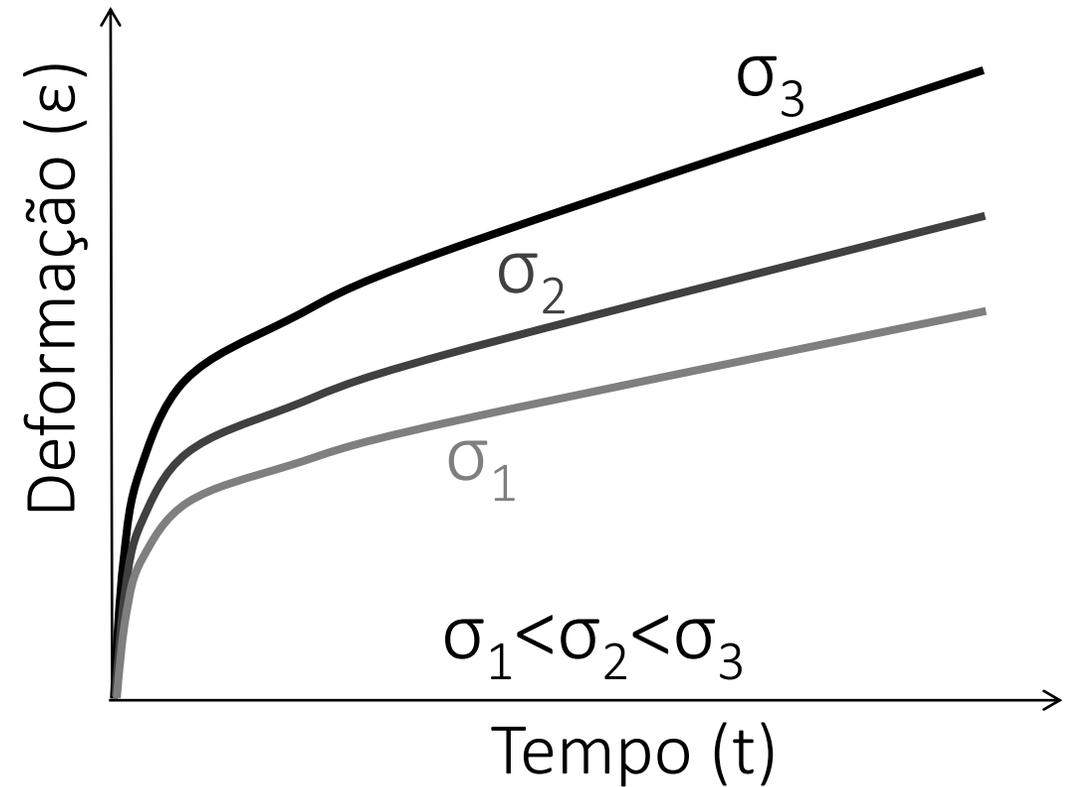
# Propriedades de longo prazo



**CREEP DEFLECTIONS**

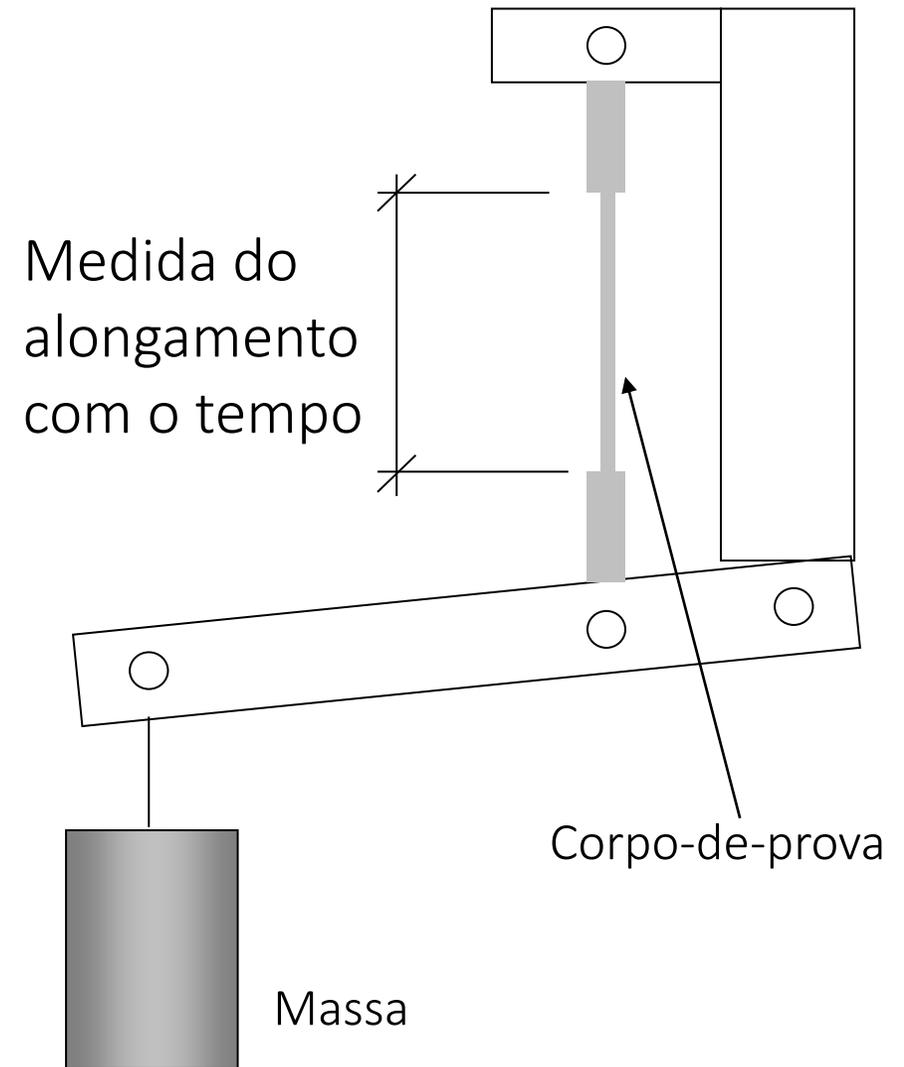
# Deformação lenta

- Elástica ou viscosa (fluência)
- Depende do tempo, exemplos:
  - **Concreto, vidro, asfalto, rochas, metais, madeira, polímeros...**



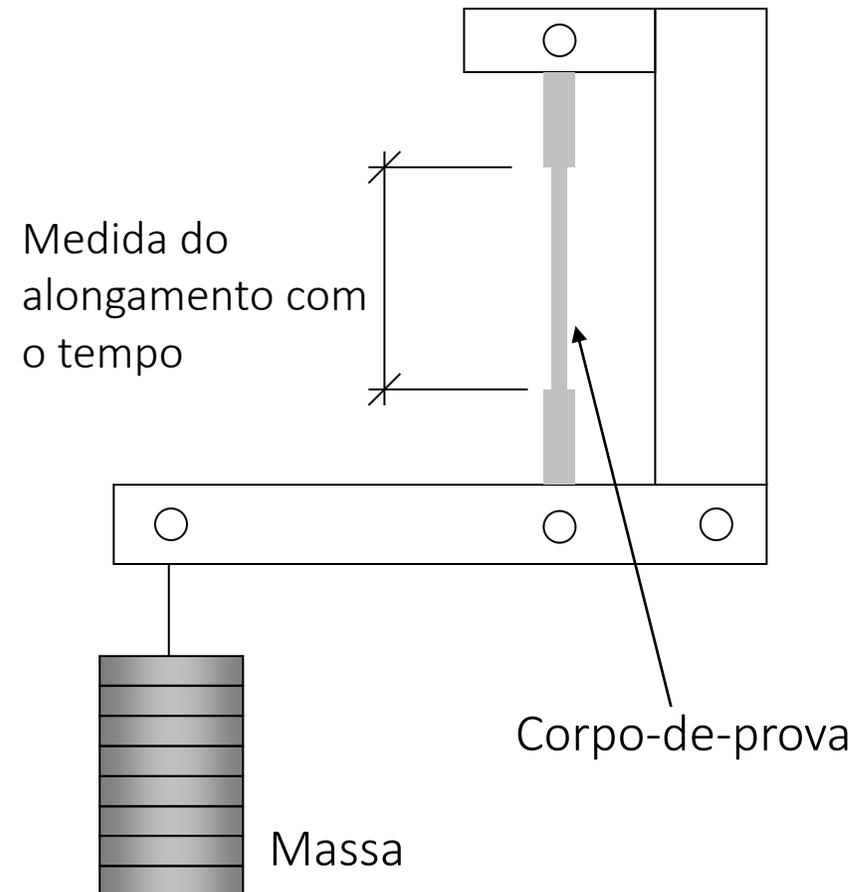
# Fluência

- Tensão constante com deformação crescente
- Sólidos amorfos ou cristalino com defeitos
- Sólidos com poros saturados de água.
- Deslocamento relativo entre moléculas/íons da estrutura cristalina
- Deformação típica de concreto submetido a cargas de longa duração



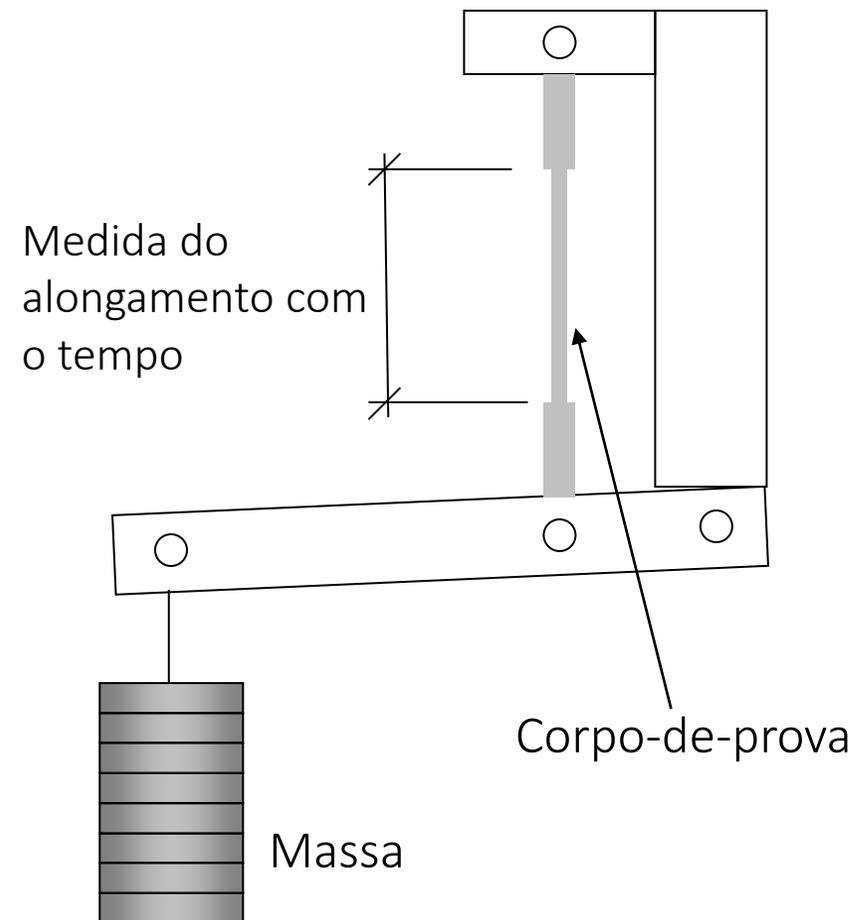
# Ensaio de relaxação

- Deformação constante imposta ao material
- Tensão decrescente com o tempo
  - Elástico
  - Aço de protensão
  - Argamassas de revestimento
- Mesmo “mecanismo” da fluência



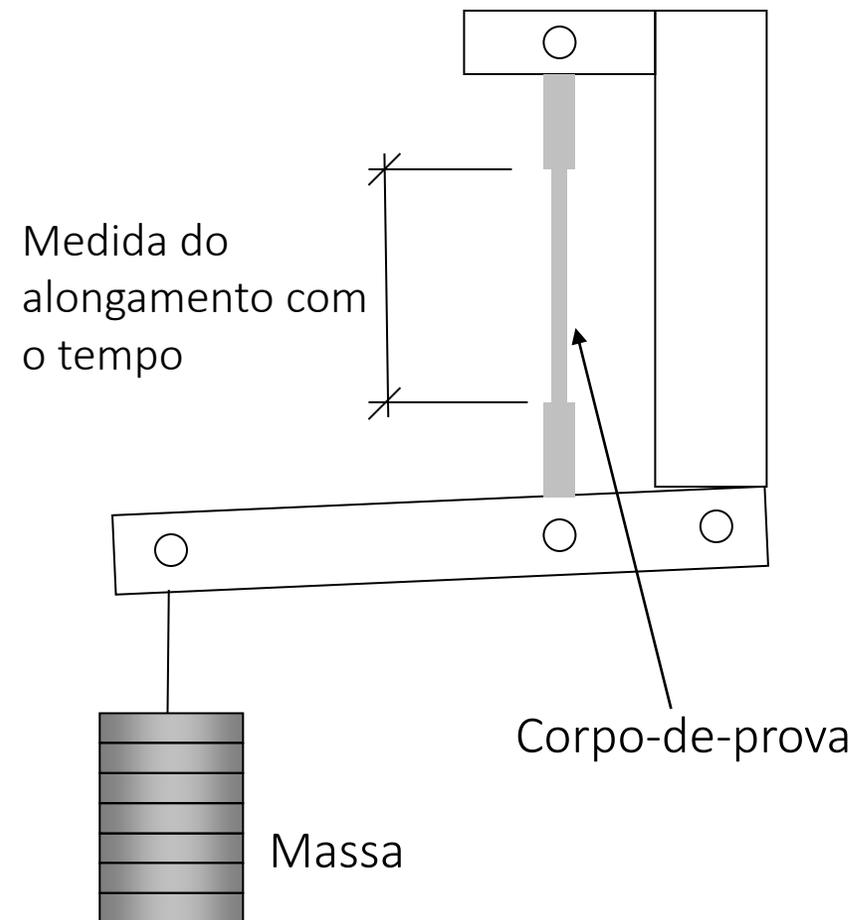
# Ensaio de relaxação

- Deformação constante imposta ao material
- Tensão decrescente com o tempo
  - Elástico
  - Aço de protensão
  - Argamassas de revestimento
- Mesmo “mecanismo” da fluência



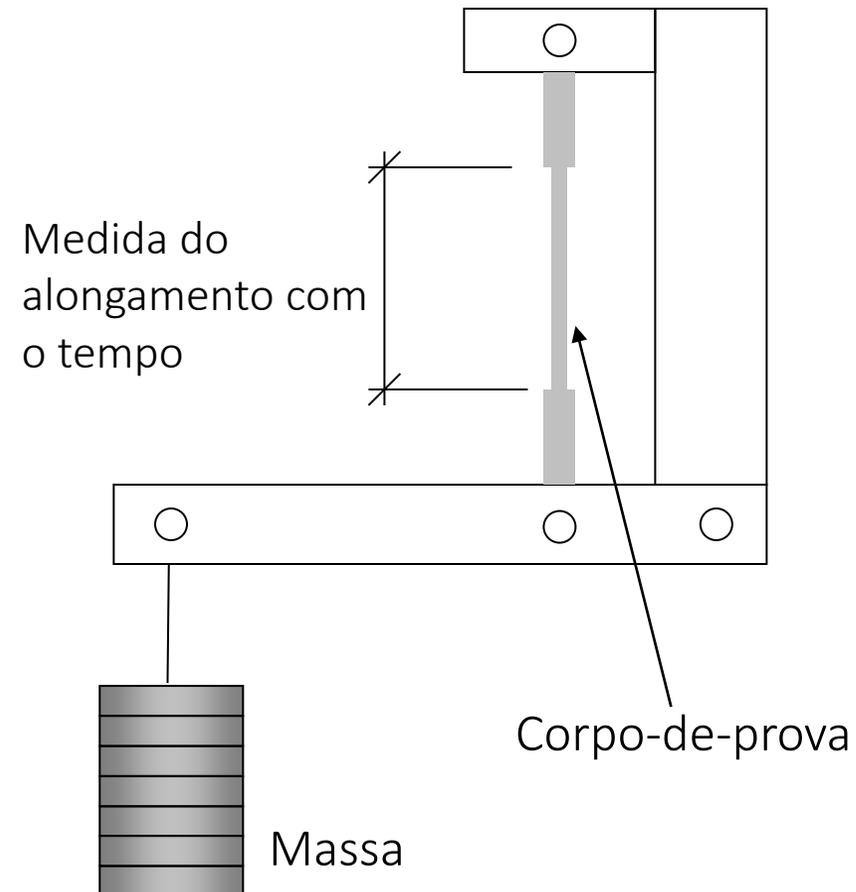
# Ensaio de relaxação

- Deformação constante imposta ao material
- Tensão decrescente com o tempo
  - Elástico
  - Aço de protensão
  - Argamassas de revestimento
- Mesmo “mecanismo” da fluência



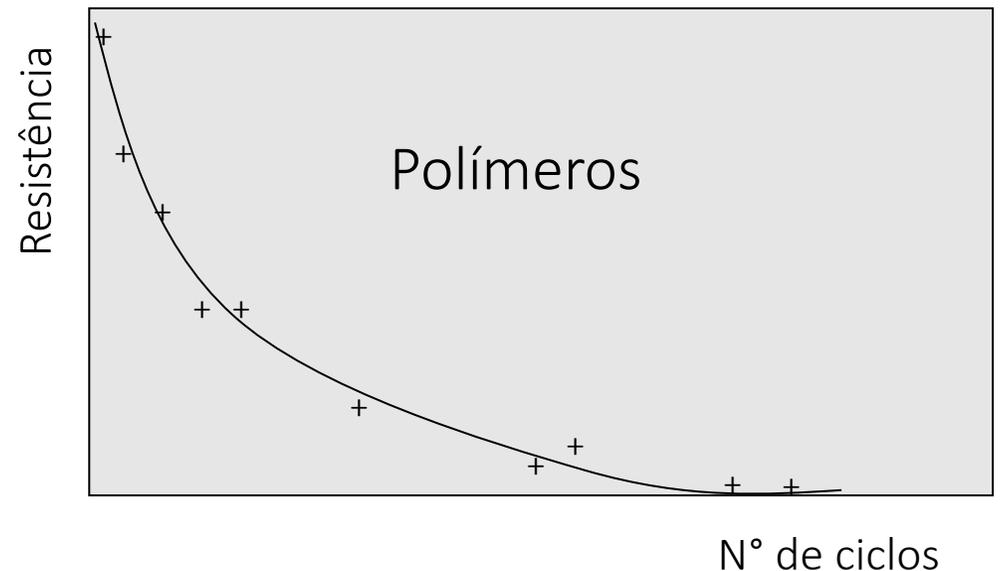
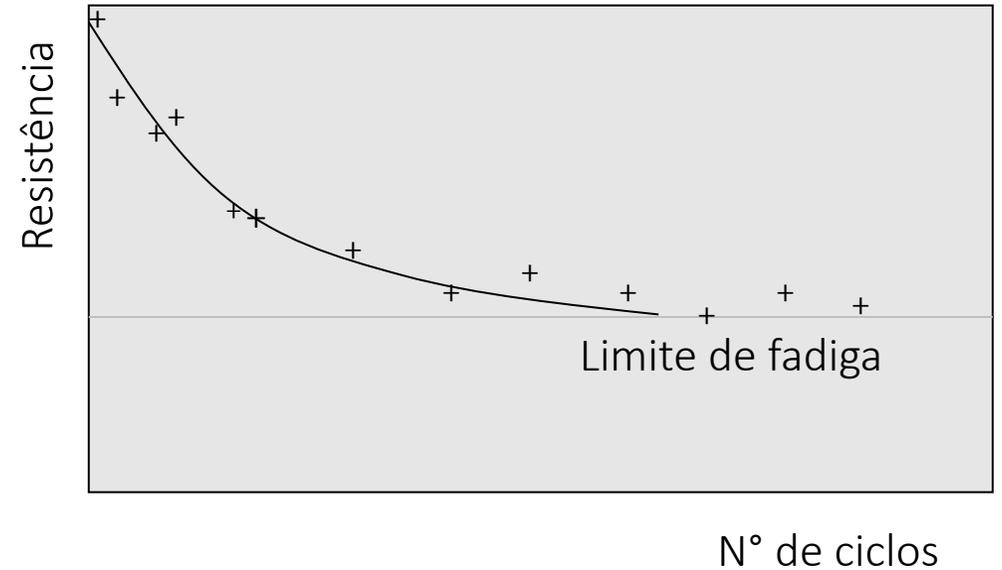
# Ensaio de relaxação

- Deformação constante imposta ao material
- Tensão decrescente com o tempo
  - Elástico
  - Aço de protensão
  - Argamassas de revestimento
- Mesmo “mecanismo” da fluência



# Fadiga

- Esforço cíclico  $\rightarrow$  rompe em tensão  $< R_{mec}$
- Função da proximidade da tensão de operação da resistência do material



# O problema de medir propriedades

- Problema metrológico
  - Precisão de medida
  - Calibração
    - Prensa
    - Capeamento
  - Erros do operador
  - Capeamento/polimento

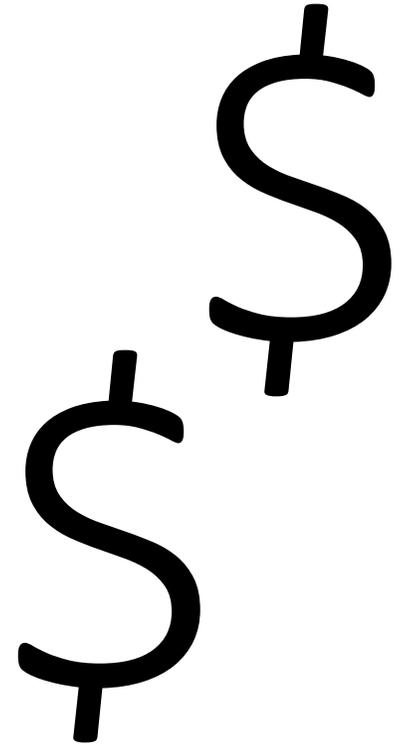


- **Representatividade**
  - Amostragem
  - Variabilidade
- **Significância estatística e física**



# Custo

- Viabiliza ou não a aplicação de um material
- Custo unitário não é suficiente (verificação da influência no processo)
- Custo ambiental
- Custo social
- SUSTENTABILIDADE



# A melhor solução de engenharia

Condições atuais  
impõem soluções  
criativas e valorizam  
a engenharia

