

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio

NECE

Experimento de ensino baseado em problemas

Módulo 01: Análise estrutural de vigas

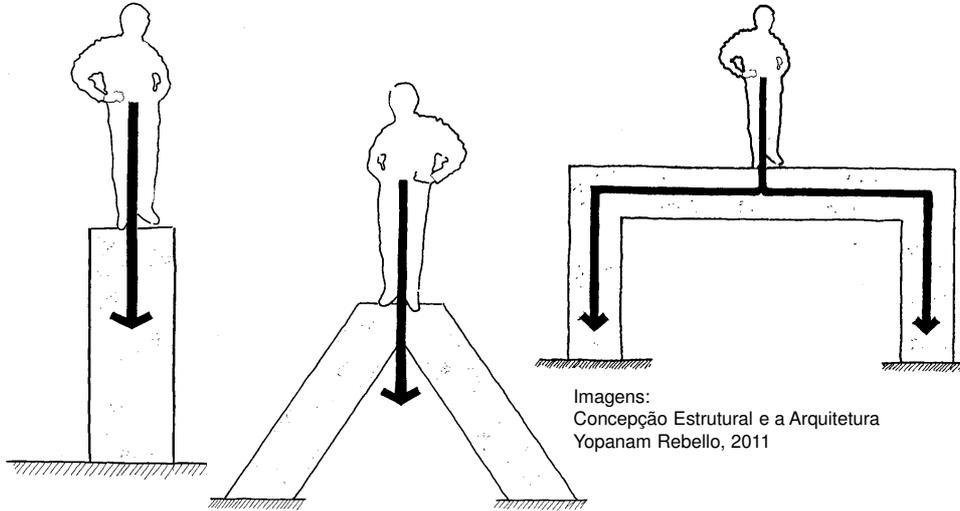
Aula 02: Estruturas com barras sob comportamento axial

Elisa Sotelino
Luiz Fernando Martha

Objetivos

- Definir importantes propriedades de materiais utilizados em construção.
- Definir *tensão normal* e *deformação normal*.
- Mostrar que o parâmetro geométrico fundamental para o comportamento à tração de uma barra é a área da seção transversal.
- Descrever um experimento físico em laboratório – o *Ensaio de Tração* – cujo objetivo é obter o *Diagrama Tensão-Deformação*: uma curva que relaciona tensões normais com deformações normais para um dado material.
- Mostrar que materiais têm importantes propriedades mecânicas obtidas do Diagrama Tensão-Deformação.

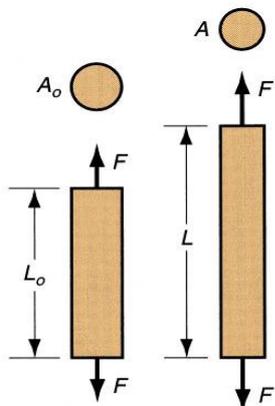
Questão fundamental: como se processa a transferência de cargas em uma estrutura?



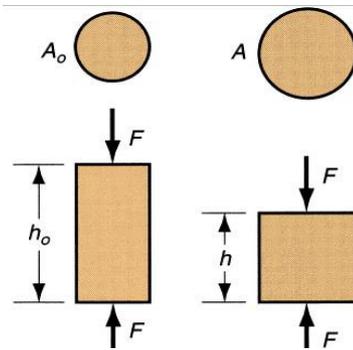
Imagens:
Concepção Estrutural e a Arquitetura
Yopanam Rebello, 2011

Mecanismos mais básicos: Tração e Compressão

Tração

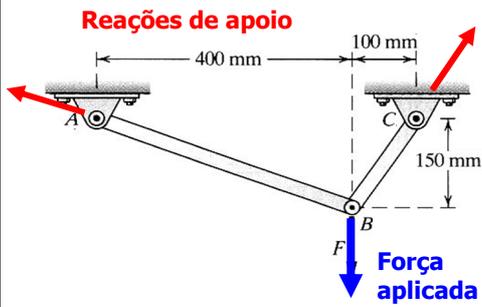


Compressão

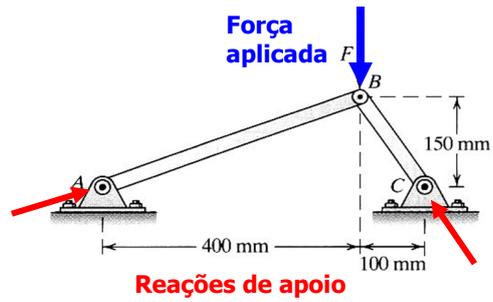


Tração e Compressão

Barras tracionadas



Barras comprimidas



Compressão



Balanced Rock, Arches National Park
(photo courtesy P.M. Anderson)

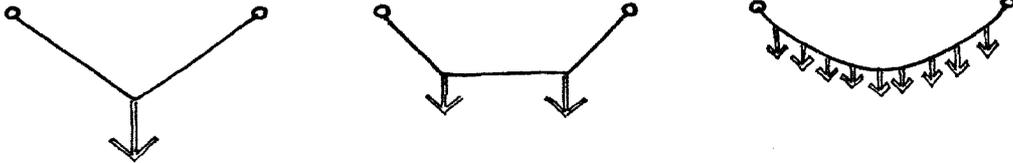


Canyon Bridge, Los Alamos, NM
(photo courtesy P.M. Anderson)



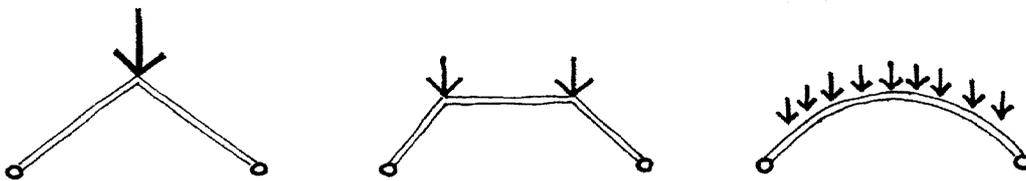
Elemento estrutural sob compressão.

Tração de cabos



Imagens:
"Concepção Estrutural e a Arquitetura"
Yopanam Rebello, 2011

Compressão de escoras e arcos



Imagens:
"Concepção Estrutural e a Arquitetura"
Yopanam Rebello, 2011

Treliça: combinação de barras tracionadas e comprimidas

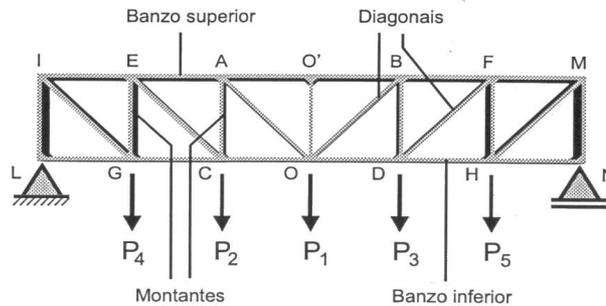


Imagem:
"Estruturas: Uma Abordagem Arquitetônica"
Maciel da Silva & Kramer Souto, 2007

Outros mecanismos: flexão, cisalhamento e torção

Flexão

Foco deste módulo

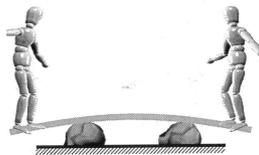
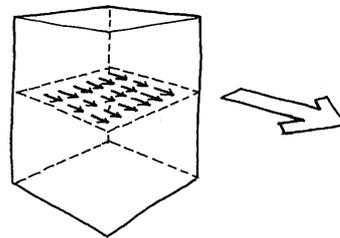


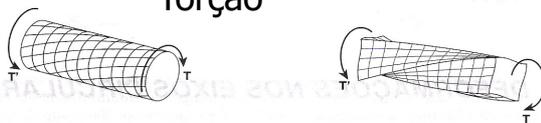
Imagem:
"Estruturas: Uma Abordagem Arquitetônica"
Maciel da Silva & Kramer Souto, 2007

Cisalhamento

Imagem:
"Concepção Estrutural e a Arquitetura"
Yopanam Rebello, 2011

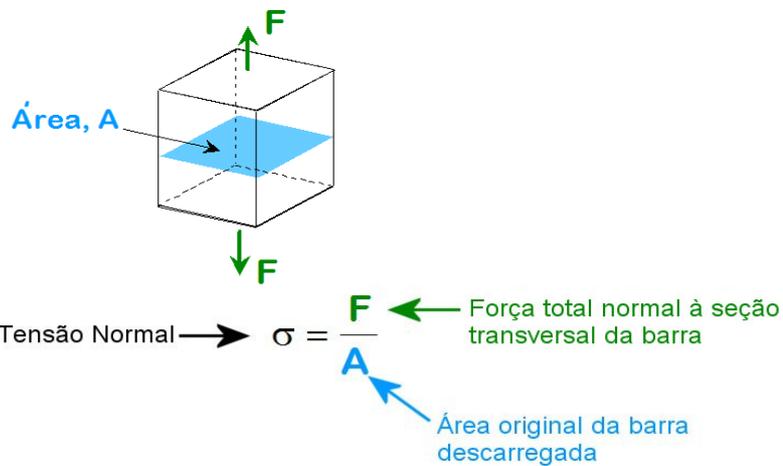


Torção



Assunto de aulas futuras

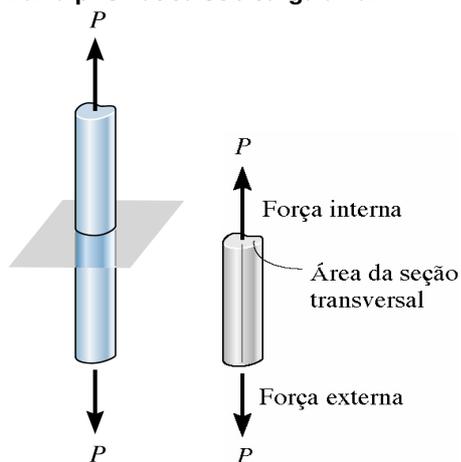
Tensão normal



Tensão tem unidade de força por área:
 $N/m^2 = Pa$ (Pascal)
 $N/mm^2 = MPa$ (mega-Pascal)

Tensão normal média

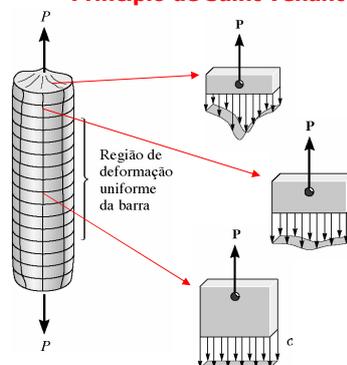
Barra prismática sob carga axial



Hipóteses

- Barra permanece reta e seção transversal permanece plana
- Material homogêneo e isotrópico

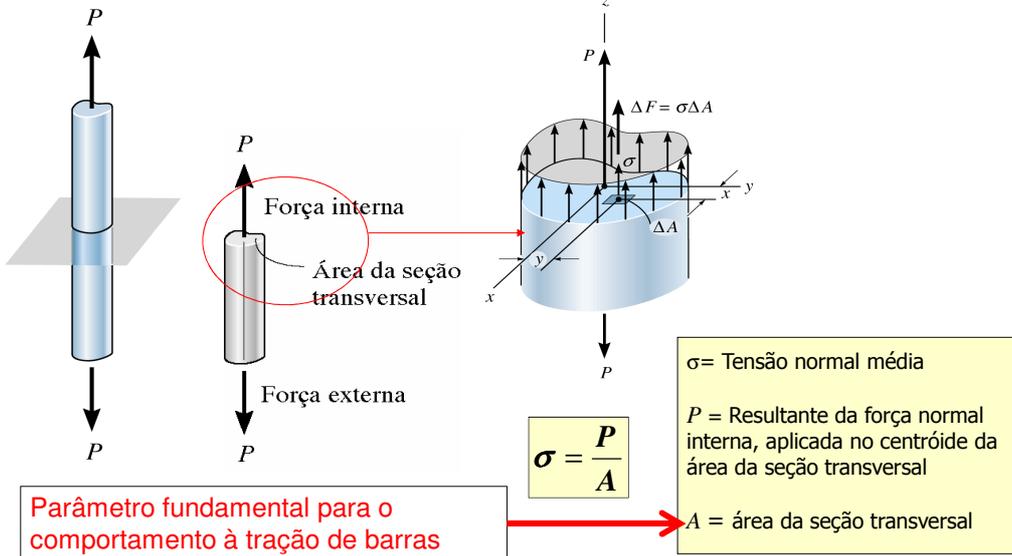
Princípio de Saint Venant



Princípio de Saint Venant:
O efeito de uma força à distância independe da maneira local de como ela é aplicada.

Tensão normal média

Barra prismática sob carga axial

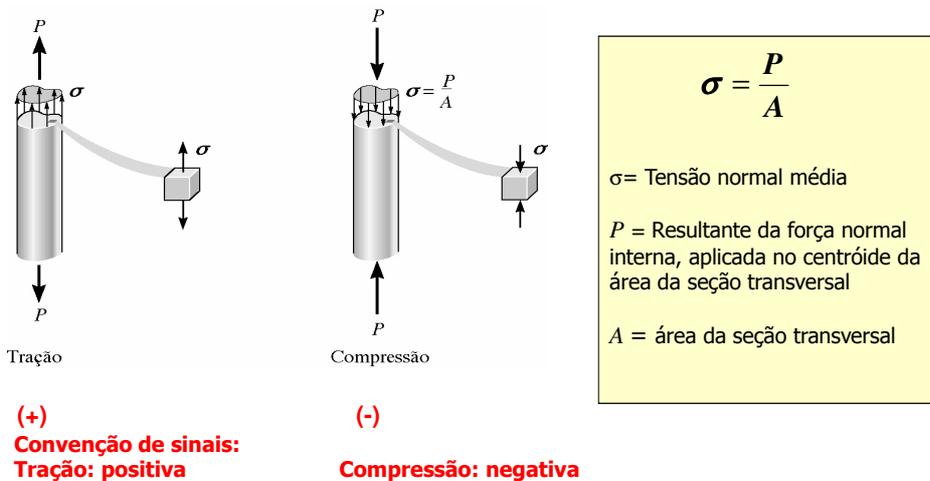


PUC-Rio – NECE – Estruturas com barras sob comportamento axial – Elisa Sotelino e Luiz Fernando Martha

13

Tensão normal média

Barra prismática sob carga axial



PUC-Rio – NECE – Estruturas com barras sob comportamento axial – Elisa Sotelino e Luiz Fernando Martha

14

Efeito da tração

Rompimento de uma barra deformada por tração



Estricção

Rompimento de material

(a)

(b)

Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc.

Efeito da compressão

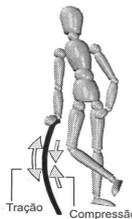
Barra deformada por compressão sem flambagem



Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc.

Barra deformada por compressão com flambagem

Imagem:
"Estruturas: Uma Abordagem Arquitetônica"
Maciel da Silva & Kramer Souto, 2007



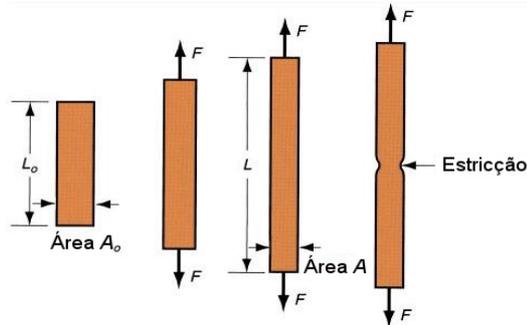
Fenômeno da flambagem:

Perda de estabilidade pela flexão de uma barra induzida por compressão.

Ocorre porque a compressão nunca é perfeitamente centrada no eixo da barra.

Assunto de aula futura

Tensão normal "de engenharia" e tensão normal real



Tensão normal "de engenharia"
 Área da seção transversal adotada: da barra antes do carregamento

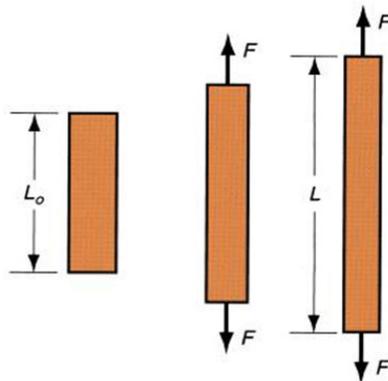
$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

Usualmente adotada

Tensão normal real
 Área da seção transversal adotada: após a deformação da barra

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

Deformação normal por tração



Deformação normal:
 razão da variação de comprimento
 pelo comprimento inicial

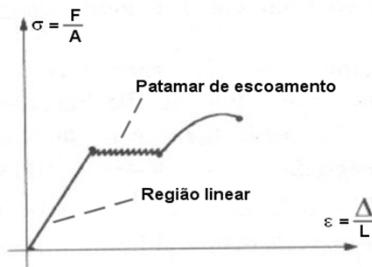
$$\Delta = L - L_0$$

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

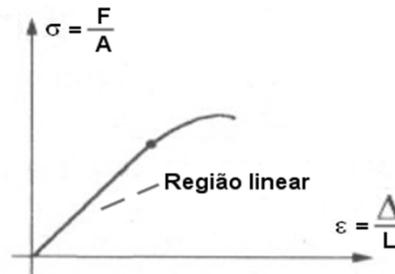
Propriedades dos materiais

A curva que relaciona tensão normal vs. deformação normal é uma característica do material, que independe dos valores adotados para força aplicada e dimensões (comprimento e área).

Material com patamar de escoamento



Material sem patamar de escoamento

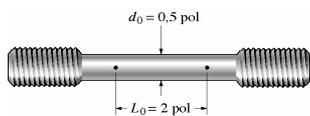


Ensaio de tração

Ensaio de tração



Corpo de prova



Ensaio de compressão

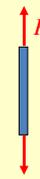
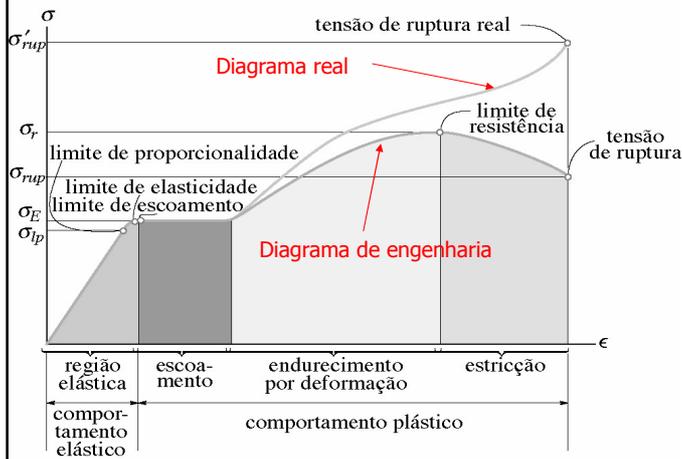


Corpo de prova



Propriedades dos materiais

Diagrama tensão x deformação (aço)



$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Diagrama de engenharia

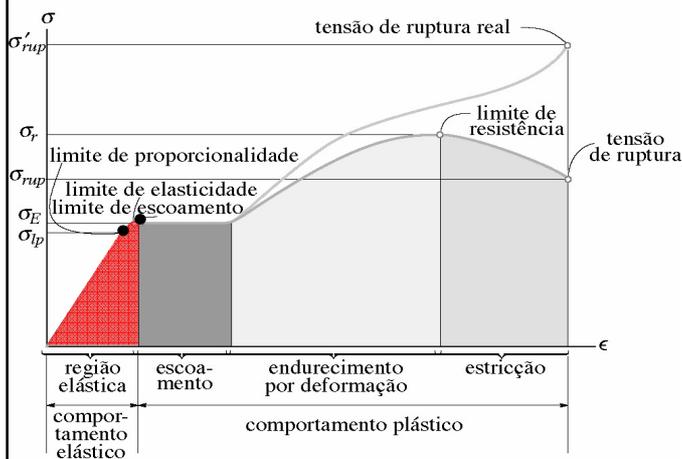
- A = Área original (barra indeformada)

Diagrama real

- A = Área real (barra deformada)

Propriedades dos materiais

Diagrama tensão x deformação (aço)



Comportamento elástico



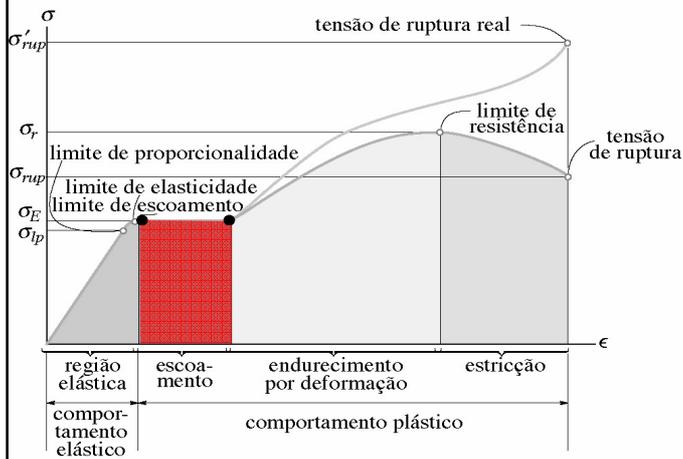
- Se a carga for removida, o corpo de prova volta à sua forma original

- Até o **limite de proporcionalidade**, a tensão é proporcional à deformação, o material é linearmente elástico

- Até o **limite de elasticidade**, o material é elástico

Propriedades dos materiais

Diagrama tensão x deformação (aço)



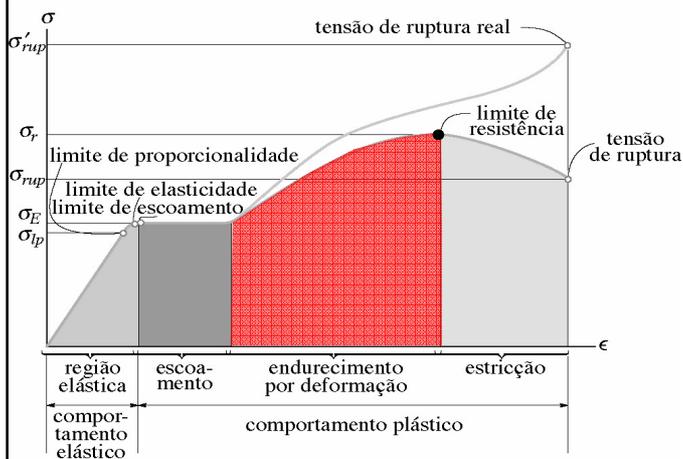
Escoamento



- Se a carga for removida, há uma parcela de deformação permanente (**deformação plástica**)
- A tensão que provoca o escoamento é o **limite de escoamento**
- Material perfeitamente plástico

Propriedades dos materiais

Diagrama tensão x deformação (aço)



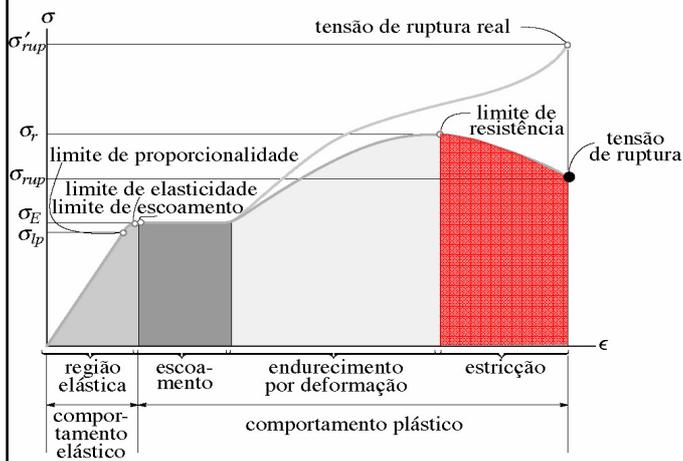
Endurecimento por deformação



- O escoamento termina e a curva cresce continuamente (**endurecimento**), até atingir a tensão máxima denominada **limite de resistência**
- Desde o início do teste até o limite de resistência, a área da seção transversal decresce uniformemente

Propriedades dos materiais

Diagrama tensão x deformação (aço)



Estricção



- A seção transversal começa a diminuir em uma região localizada do corpo de prova (**estricção**)

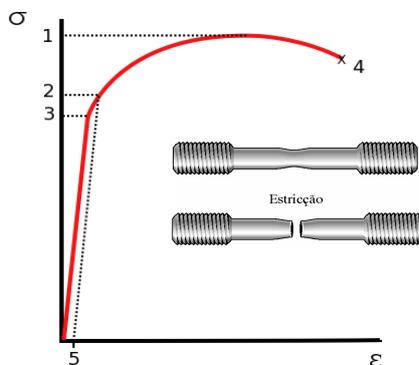
- A curva decresce até que o corpo de prova rompa com a **tensão de ruptura**



Propriedades dos materiais

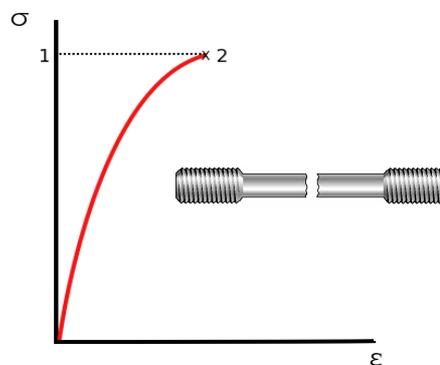
Material dúctil

- Sofre grandes deformações antes da ruptura
- Ex: Aço doce, latão, alumínio



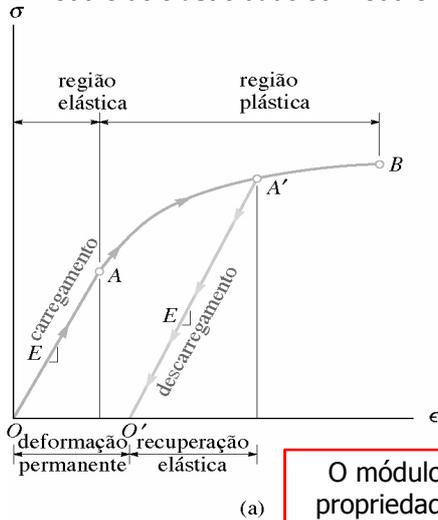
Material frágil

- Sofre pouco ou nenhum escoamento antes da ruptura
- Ex: Ferro fundido, concreto



Propriedades dos materiais

Módulo de elasticidade ou módulo de Young



- Na fase linear, um aumento da tensão provoca um aumento proporcional da deformação

Lei de Hooke:

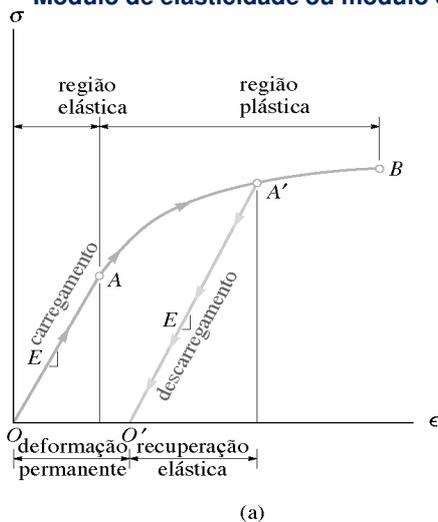
$$\sigma = E \epsilon$$

σ = Tensão normal (Pa)
 ϵ = Deformação normal (m/m)
 E = Módulo de elasticidade ou módulo de Young (Pa=N/m²)

O módulo de elasticidade é uma das mais importantes propriedades dos materiais: E é o coeficiente angular do trecho linear da curva $\sigma \times \epsilon$

Propriedades dos materiais

Módulo de elasticidade ou módulo de Young



Metal	Módulo de Young, $Y \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$
Cobre estirado a frio	12.7
Cobre, fundido	8.2
Cobre laminado	10.8
Alumínio	6.3-7.0
Aço, carbono	19.5-20.5
Aço fundido	20.6
Aço, fundido	17.0
Zinco laminado	8.2
Latão estirado a frio	8.9-9.7
Latão naval laminado	9.8
Bronze de alumínio	10.3
Titânio	11.6
Níquel	20.4
Prata	8.27

Propriedades dos materiais

Resumo dos parâmetros de material obtidos do diagrama tensão-deformação

E = Módulo de elasticidade (coeficiente angular do trecho linear do diagrama)

σ_{lp} = Tensão limite de proporcionalidade (limite do trecho linear do diagrama)

σ_E = Tensão limite de elasticidade = Tensão limite de escoamento
(acima desse limite o material adquire deformações plásticas permanentes).

σ_r = Tensão limite de resistência (máximo valor do diagrama)

σ_{rup} = Tensão limite de ruptura
(tensão correspondente à máxima deformação atingida antes do rompimento)

Teste: ensaio de tração

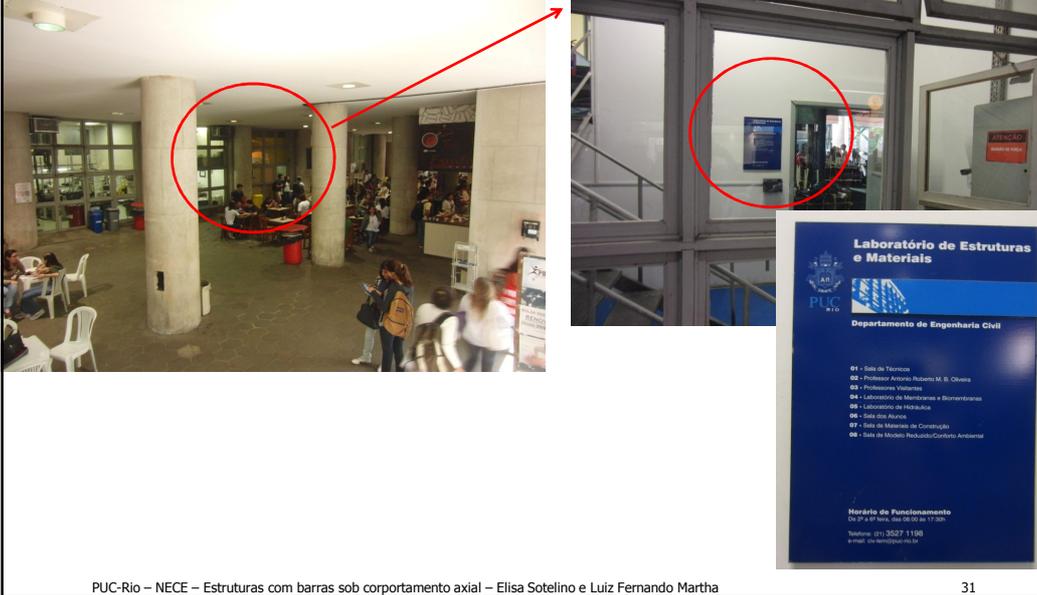
Objetivos:

1. Obtenção do diagrama tensão-deformação a partir de um diagrama força-alongamento obtido em um ensaio de tração.

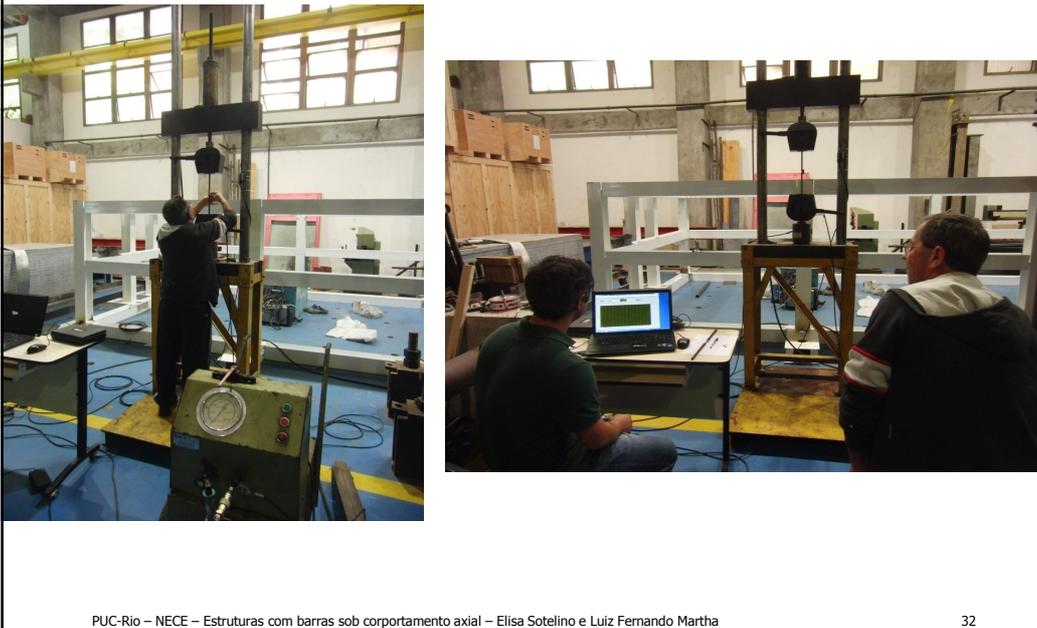
$$P \times \Delta \longrightarrow \sigma \times \varepsilon$$

2. Determinação do módulo de elasticidade do material ensaiado.
3. Determinação da tensão limite de escoamento do material.
4. Determinação da tensão limite de resistência do material.

Local do ensaio de tração realizado: Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-Rio



Ensaio de tração



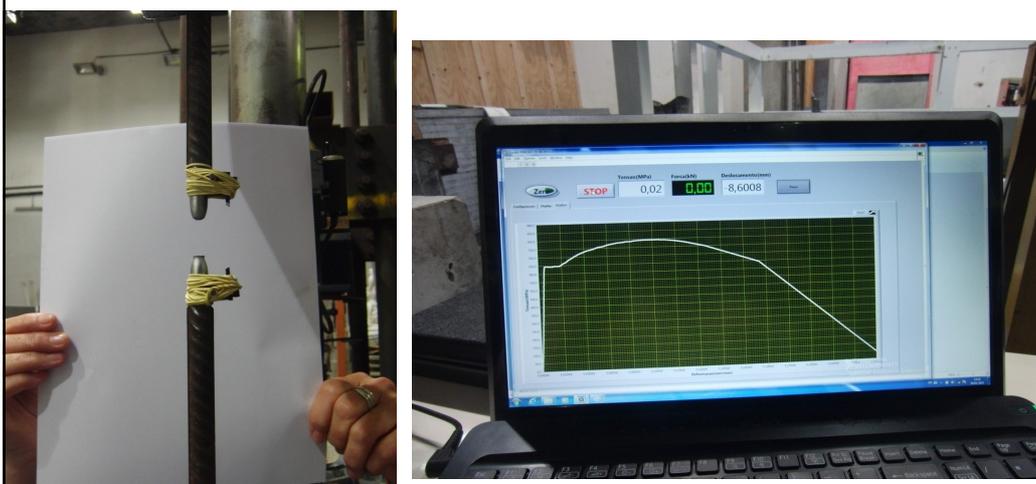
Ensaio de tração



PUC-Rio – NECE – Estruturas com barras sob comportamento axial – Elisa Sotelino e Luiz Fernando Martha

33

Ensaio de tração



PUC-Rio – NECE – Estruturas com barras sob comportamento axial – Elisa Sotelino e Luiz Fernando Martha

34