



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

PME-3210 - Mecânica dos Sólidos I

Aula #01

Prof. Dr. Roberto Ramos Jr.

22/03/2022



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

Agenda:

1. Apresentação Geral do Curso
2. Objetivo do Curso e Pontos Importantes
3. Conteúdos da Aula #01
 - ✓ 3.1 Conceito de Estrutura e Objetivos da Análise/Projeto Estrutural
 - ✓ 3.2 Conceitos fundamentais : tensão normal e deformação
 - ✓ 3.3 Diagramas Tensão $\times$ Deformação
 - ✓ 3.4 Principais Elementos Estruturais



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

1. Apresentação Geral do Curso

Nome da Disciplina: Mecânica dos Sólidos I

Sigla da Disciplina: PME-3210

Número de Créditos-Aula: 4 CA (1 CA = 15 horas de atividades)

Número de Créditos-Trabalho: 0 CT (1 CT = 30 horas de atividades)

Turmas: 2022101 – Prof. Roberto Ramos Junior (rramosjr@usp.br)

2022102 – Prof. Clóvis de Arruda Martins (cmartins@usp.br)

Monitoria: Giovanna Giroto (gigirotto@usp.br)

Aulas: 3as, das 13:10 às 14:50 (Teoria)

6as, das 09:20 às 11:00 (Exercícios)

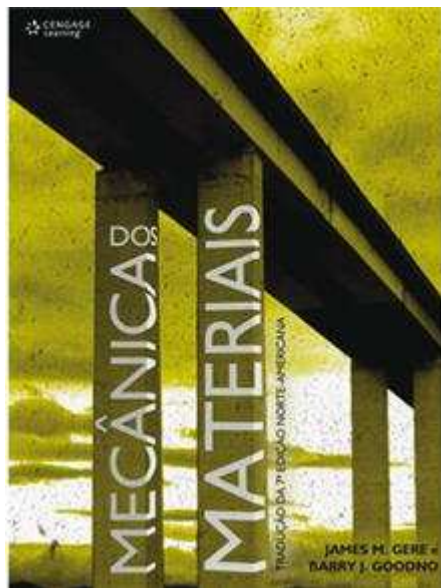
Cronograma, avisos e outros: ver <https://edisciplinas.usp.br/>



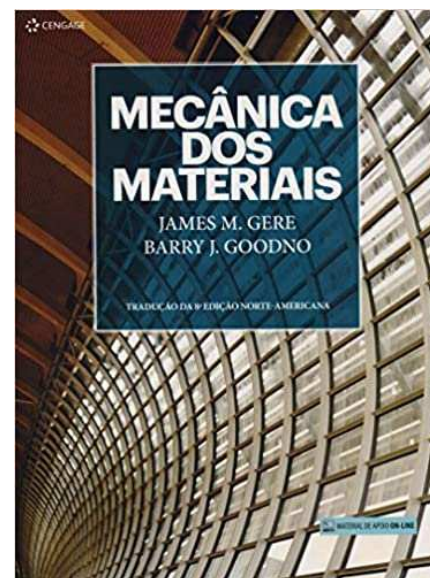
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

Livro Texto:

Gere, J.M.; Goodno, B.J. Mecânica dos Materiais , trad. 7ª ed. Norte-americana, Cengage Learning, 2010, 860p.



(7ª Edição)



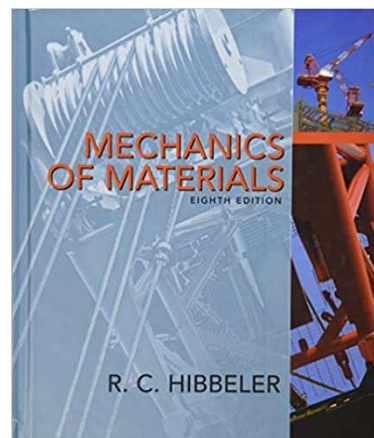
(8ª Edição)



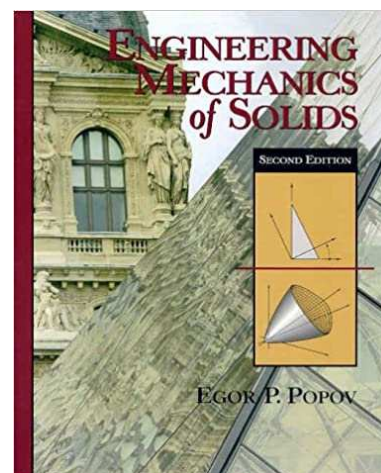
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

Outros livros de apoio:

Hibbeler, R.C. Mechanics of Materials,
8th ed., Ed. Pearson, 2011, 888p.



Popov, E.P. Engineering Mechanics of
Solids, 2nd ed., Prentice-Hall, Inc., 1998,
864p.





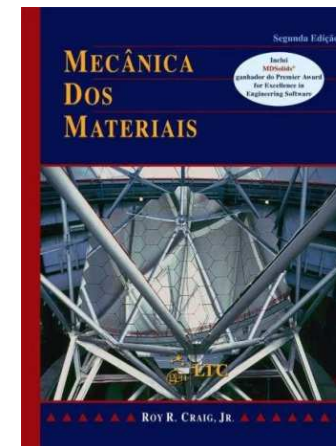
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

Outros livros de apoio:

Philpot T.A. Mecânica dos Materiais - Um Sistema Integrado de Ensino, 2ª ed., Ed. LTC, 2013, 730p.



Craig, Jr., R.R. Mecânica dos Materiais, 2ª ed., Ed. LTC, 2003, 570p.





Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

Critério de Aprovação:

$$A = \frac{P1 + P2 + P3}{3} \geq 5,0 \quad \text{e} \quad F \geq 70\%$$

Data da P1: 05/05/2022, das 10:00 às 12:00

Data da P2: 09/06/2022, das 10:00 às 12:00

Data da P3: 14/07/2022, das 10:00 às 12:00

Data da Sub: 21/07/2022, das 10:00 às 12:00

Obs:

- a) A nota da Sub substitui a menor das notas obtidas;
- b) PME-3210 não oferece prova de recuperação!



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

2. Objetivo do Curso e Alguns Pontos Importantes

2.1. Objetivo do Curso:

Apresentar conceitos preliminares sobre o comportamento das estruturas , fornecendo a base necessária a cursos mais avançados.

2.2. Pontos Importantes:

- Requisito para PME-3210: PME-3100 (Mecânica I)
- Requisitos para PME-3100: MAT-2453 (Cálculo Diferencial e Integral I) e MAT-3457 (Álgebra Linear I)



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

2.2. Pontos Importantes (continuação):

- PME-3210 serve como requisito para PME-3211 (Mecânica dos Sólidos II)
- Apesar de não constarem como requisitos para outras disciplinas do curso de Engenharia Mecânica, as disciplinas PME-3210 e PME-3211 auxiliam no entendimento de conceitos apresentados em outras disciplinas como:
 - * PME-3400 (Vibrações) – 5º semestre;
 - * PME-3320 (Metodologia do Projeto I) – 5º semestre;
 - * PME-3350 (Elementos de Máquinas I) – 6º semestre;
 - * PME-3421 (Metodologia do Projeto II) – 7º semestre.



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

2.2. Pontos Importantes (final):

Com os conteúdos da disciplina, espera-se que o egresso do curso de Engenharia Mecânica seja capaz de:

- Utilizar corretamente as unidades empregadas para as diversas grandezas mecânicas relacionadas à análise estrutural;
- Reconhecer imediatamente quando uma fórmula está (ou não) correta dimensionalmente;
- Interpretar corretamente as ordens de grandeza (de tensões, deformações e deslocamentos) oriundas dos cálculos realizados, com base nas hipóteses admitidas para a utilização das formulações;
- Reconhecer as limitações das fórmulas deduzidas ao longo do curso de Mecânica dos Sólidos;
- Projetar e analisar estruturas relativamente simples formadas por barras, molas, cabos e vigas.



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

3. Conteúdos da Aula #01

3.1 Conceito de Estrutura e Objetivos da Análise/Projeto Estrutural

Etimologia (origem da palavra *estrutura*): Do latim *structura* (pl.: *structurae*)

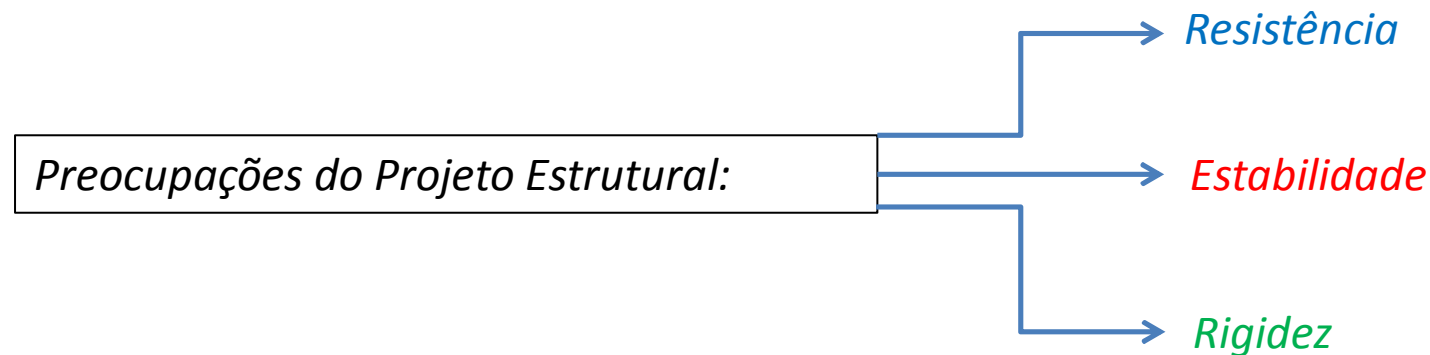
Entre as diversas acepções da palavra, uma estrutura é qualquer objeto/corpo capaz de resistir a esforços e transmitir esforços.

Em linhas gerais a Engenharia de Estruturas é o ramo da engenharia (civil, mecânica, naval, aeronáutica, etc) dedicado primordialmente ao projeto e à análise de estruturas. De forma simplificada, é a aplicação da **mecânica dos sólidos** ao projeto ou análise de edifícios, pontes, muros de contenção, barragens, túneis, plataformas de petróleo, navios, aviões, automóveis, equipamentos mecânicos e outras estruturas [1,2].



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

*“O objetivo do projeto de uma estrutura é permitir que a mesma **atenda à sua função primária sem entrar em colapso e sem deformar ou vibrar excessivamente**. Dentro destes limites, os quais são precisamente definidos pelas normas técnicas, o engenheiro estrutural almeja o melhor uso dos materiais disponíveis com o menor custo possível de construção e manutenção da estrutura” [2].*





Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

Exemplos de Estruturas (e de falhas estruturais):



Fig.1: Falha do dente de uma engrenagem [3]



Fig.2: Ruptura dos tendões de um duto flexível
junto à terminação, por fadiga [4]



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

Exemplos de Estruturas (e de falhas estruturais):



Fig.3: Falha da estrutura de um telhado pela ação de ventos/chuvas/carga adicional [5]



Fig.4: Falha da estrutura de uma aeronave (Boeing 737) por corrosão e fadiga [6]



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

Exemplos de Estruturas (e de falhas estruturais):



Fig.5: Instabilidade estrutural de um tanque cilíndrico pela formação acidental de vácuo interno [7]



Fig.6: Instabilidade estrutural da armadura de tração de um duto flexível [8]



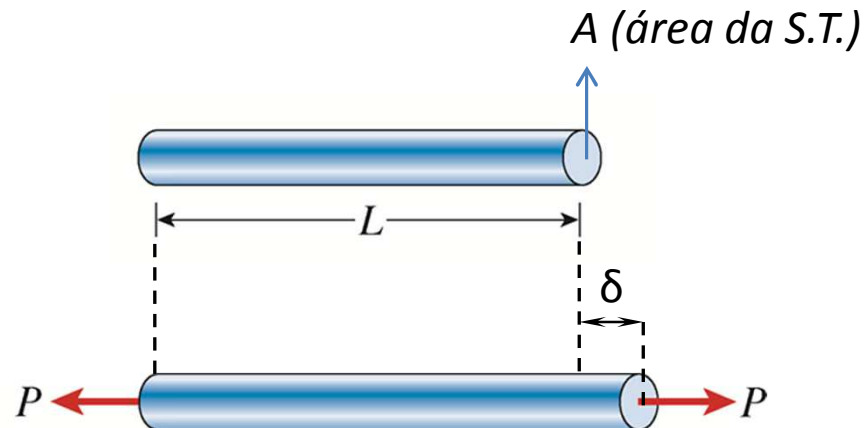
3.2 Conceitos fundamentais: tensão normal e deformação

Consideremos a seguinte situação:

- Barra prismática, eixo central reto de comprimento L , seção transversal de área A ;
- Material da barra é homogêneo e isótropo;
- Barra está submetida a uma única força normal de intensidade P cuja linha de ação passa pelos centroides das seções transversais.

Barra na Configuração de Referência (ou inicial):

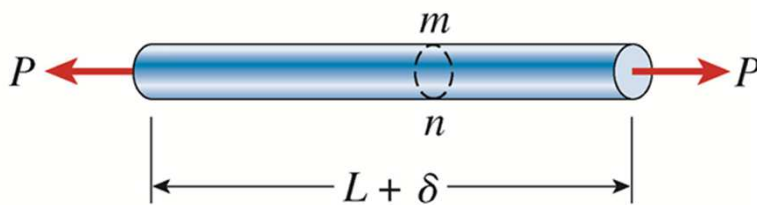
Barra na Configuração Deformada (ou final):





Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

Diferentemente do que é estabelecido na Mecânica dos Corpos Rígidos, na Mecânica dos Sólidos Deformáveis, as estruturas se deformam sob a ação dos esforços aplicados. Seja, assim, δ a variação do comprimento da barra em virtude da aplicação do carregamento.



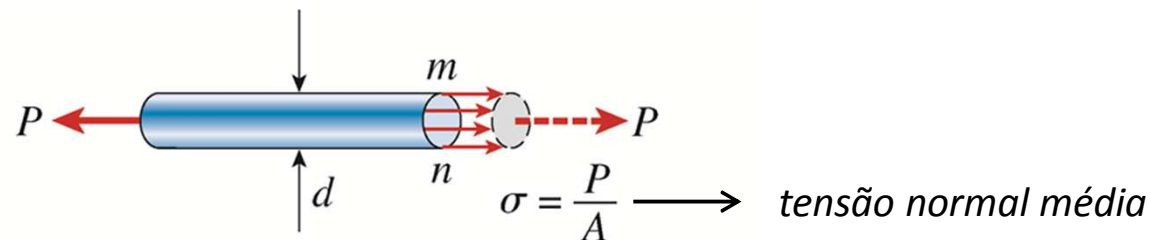
Por considerações de equilíbrio, é razoável admitir a existência de forças internas, distribuídas por unidade de área, em qualquer seção transversal intermediária $m-n$ da barra, e que devem integrar a força total P aplicada nas extremidades. Denominando estas forças internas (por unidade de área) por σ (sigma), teremos:

$$P = \iint_A \sigma dA \xrightarrow[\text{(T.V.M.)}]{\text{Hip.: } \sigma = \text{cte.}} P = \bar{\sigma} A \Leftrightarrow \bar{\sigma} = \frac{P}{A}$$



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

Às forças internas por unidade de área denominamos tensões. Como a tensão em consideração atua em uma direção normal (perpendicular) ao plano considerado, ela é denominada tensão normal. Ainda, como estamos considerando que esta tensão está uniformemente distribuída na seção transversal, ela é denominada tensão normal média.



Convenção de Sinais:

- Se a força P for de tração (de modo a provocar um aumento no comprimento da barra), consideraremos $P > 0$ e, portanto, $\sigma > 0$ será uma tensão normal de tração;
- Se a força P for de compressão (de modo a provocar uma redução no comprimento da barra), consideraremos $P < 0$ e, portanto, $\sigma < 0$ será uma tensão normal de compressão.



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

Unidades (no S.I. e no sistema inglês):

$$\text{No S.I.: } [\sigma] = \frac{[P]}{[A]} = \frac{N}{m^2} = Pa \text{ (pascal)}$$

Múltiplos: $1 \text{ kPa} = 10^3 \text{ Pa}$, $1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa}$, $1 \text{ GPa} = 10^9 \text{ Pa}$

$$\text{No Sistema Inglês: } [\sigma] = \frac{[P]}{[A]} = \frac{lbf}{in^2} = psi \text{ (pound force per square inch)}$$

Múltiplo: $1 \text{ ksi} = 10^3 \text{ psi}$

Conversões: $1 \text{ lbf} \cong 4,4482 \text{ N}$, $1 \text{ in} = 1'' = 25,4 \text{ mm}$, $1 \text{ psi} \cong 6894,76 \text{ Pa}$



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

Definimos o alongamento unitário da barra (ou seja, o alongamento por unidade de comprimento da barra) por:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L_f - L_0}{L_0} = \frac{\delta}{L} \quad (\varepsilon = \text{epsilon})$$

Nota-se, portanto, que o alongamento unitário será sempre adimensional! Observamos, também, que o alongamento unitário representa o alongamento médio das fibras que estão alinhadas segundo a direção do eixo central da barra.

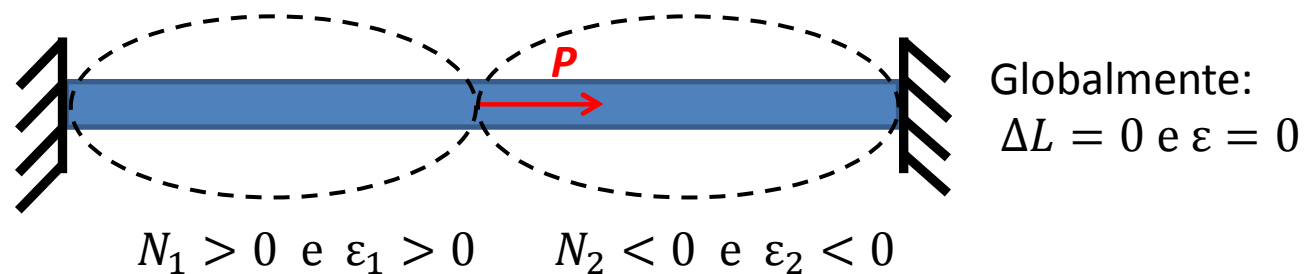
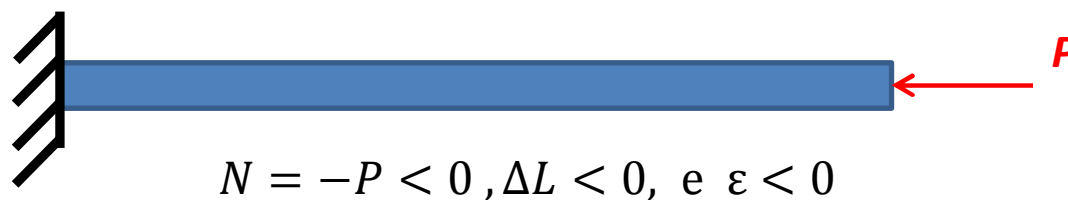
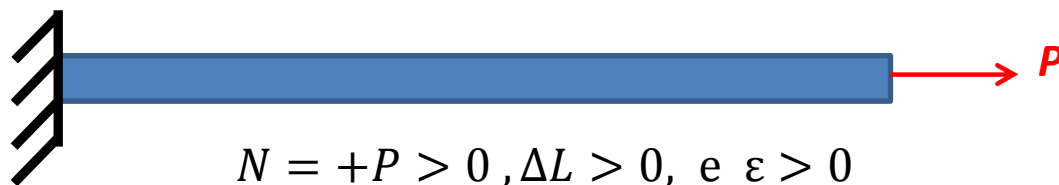
Convenção de sinais:

- Se $\Delta L > 0$, então $\varepsilon > 0$ (há um aumento no comprimento das fibras)
- Se $\Delta L < 0$, então $\varepsilon < 0$ (há uma redução no comprimento das fibras)
- Se $\Delta L = 0$, então $\varepsilon = 0$ (o alongamento médio das fibras é nulo)



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

Exemplos:



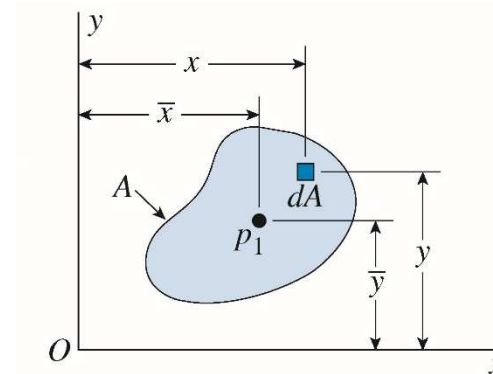
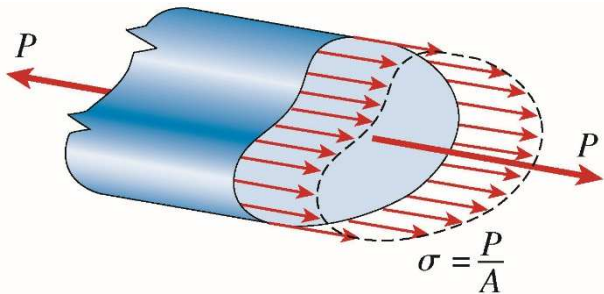


Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

Observações Adicionais:

1. A distribuição real de tensões no interior da barra (longe das extremidades) será muito próxima da tensão média $\bar{\sigma} = P/A$ desde que a linha de ação da força P passe pelos centroides das seções transversais, como veremos a seguir.

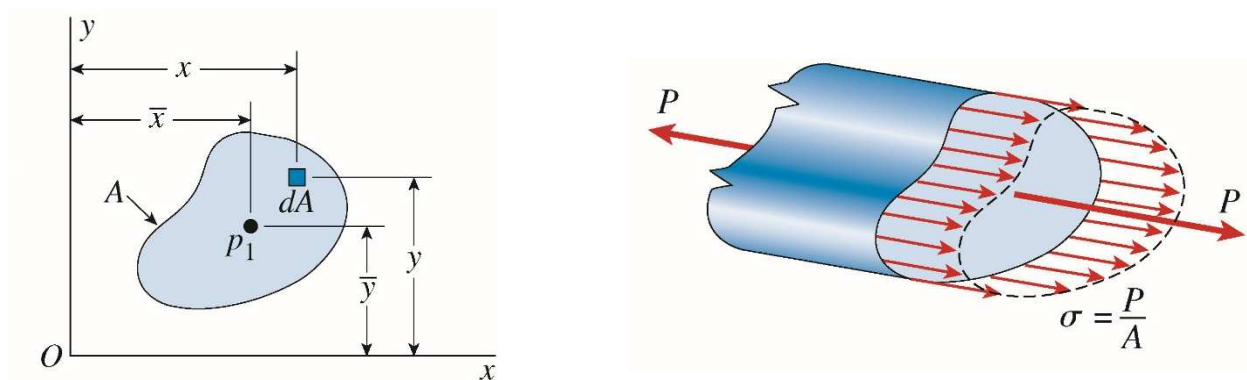
Para isto, consideremos uma barra prismática, de seção transversal arbitrária, submetida a forças P que produzem uma distribuição uniforme de tensões nas seções transversais como indicado na figura abaixo, à esquerda:





Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

Seja Oxy um par de eixos genérico, paralelo às seções transversais da barra, e seja p_1 o ponto da seção transversal em que a linha de ação das forças P intercepta uma seção transversal qualquer.



Para determinar as coordenadas de p_1 , observamos que os momentos (em torno dos eixos Ox e Oy) devidos à força P devem ser iguais aos momentos causados pela distribuição interna de tensões. Assim:

$$M_x = P\bar{y} = \iint_A \sigma y dA$$

$$M_y = -P\bar{x} = -\iint_A \sigma x dA$$



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

Mas, da hipótese de que temos uma distribuição uniforme de tensões nas seções transversais, temos:

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

Logo:

$$M_x = P\bar{y} = \frac{P}{A} \iint_A y dA \quad M_y = -P\bar{x} = -\frac{P}{A} \iint_A x dA$$

Resultando:

$$\bar{y} = \frac{1}{A} \iint_A y dA \quad \bar{x} = \frac{1}{A} \iint_A x dA$$

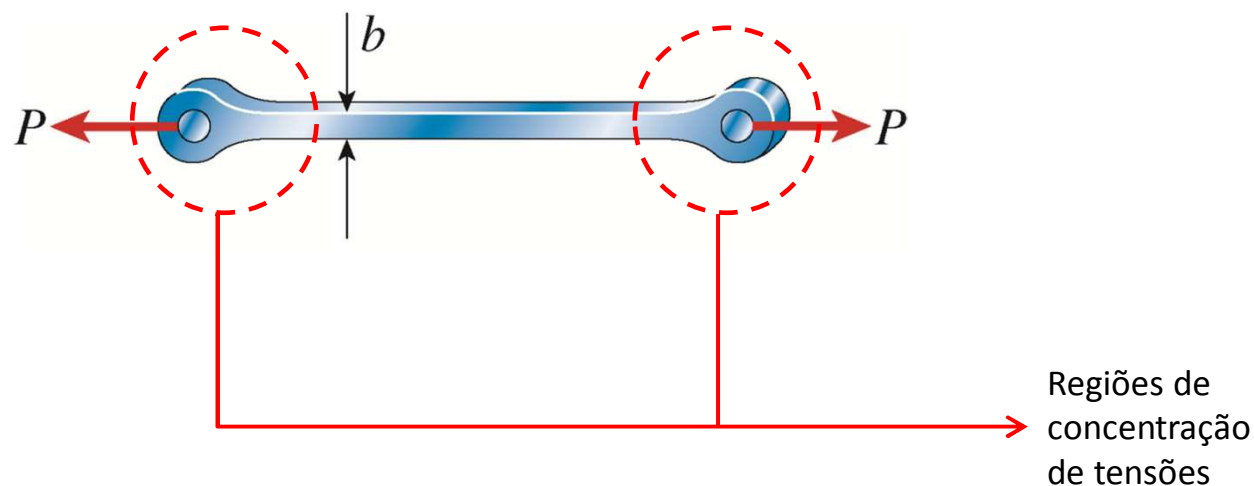
...que são justamente as equações que definem a posição do centroide da seção transversal!

Conclusão: Para haver *uma distribuição uniforme de tensões nas seções transversais da barra*, a linha de ação das forças P deve passar pelos centroides das seções transversais.



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

2. Nas extremidades da barra, a distribuição de tensões deixa de ser uniforme, mesmo nos casos em que a barra é submetida apenas a esforços de tração pura ou compressão pura:



Contudo, em grande parte da barra (longe das extremidades) a hipótese de que a distribuição de tensões é praticamente uniforme na seção transversal é bastante razoável e pode ser aplicada na prática.



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

3. É preciso distinguir a tensão de engenharia (*engineering stress*) da tensão real (*true stress*) atuante no material:

Tensão de engenharia: $\sigma = \frac{P}{A_0}$ (força aplicada por unidade de área tomada na configuração de referência)

Tensão real: $\sigma_t = \frac{P}{A_f}$ (força aplicada por unidade de área tomada na configuração deformada)

Se as deformações forem relativamente pequenas, teremos $A_0 \cong A_f \cong A$ e, neste caso, não há diferenças significativas entre a tensão de engenharia e a tensão real.



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

3.3 Propriedades Mecânicas dos Materiais

Para realizarmos o projeto (ou análise) de máquinas e estruturas, é preciso conhecer o comportamento mecânico dos materiais empregados. Em geral, isto é feito por meio da realização de ensaios mecânicos em corpos de prova do material que será empregado na construção mecânica.

Para que os resultados dos testes sejam comparáveis, as dimensões dos corpos de prova e os métodos de aplicação das cargas devem ser padronizados.

Entre as organizações que publicam especificações e padrões para a realização de ensaios mecânicos em materiais, citamos:

ASTM – American Society for Testing and Materials;

ISO – International Organization for Standardization;

ASME – The American Society of Mechanical Engineers;

BSI – British Standards Institution;

DIN – Deutsches Institut für Normung;

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, ...



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica



Equipamentos para realização
de ensaios de materiais



Ensaio de tração

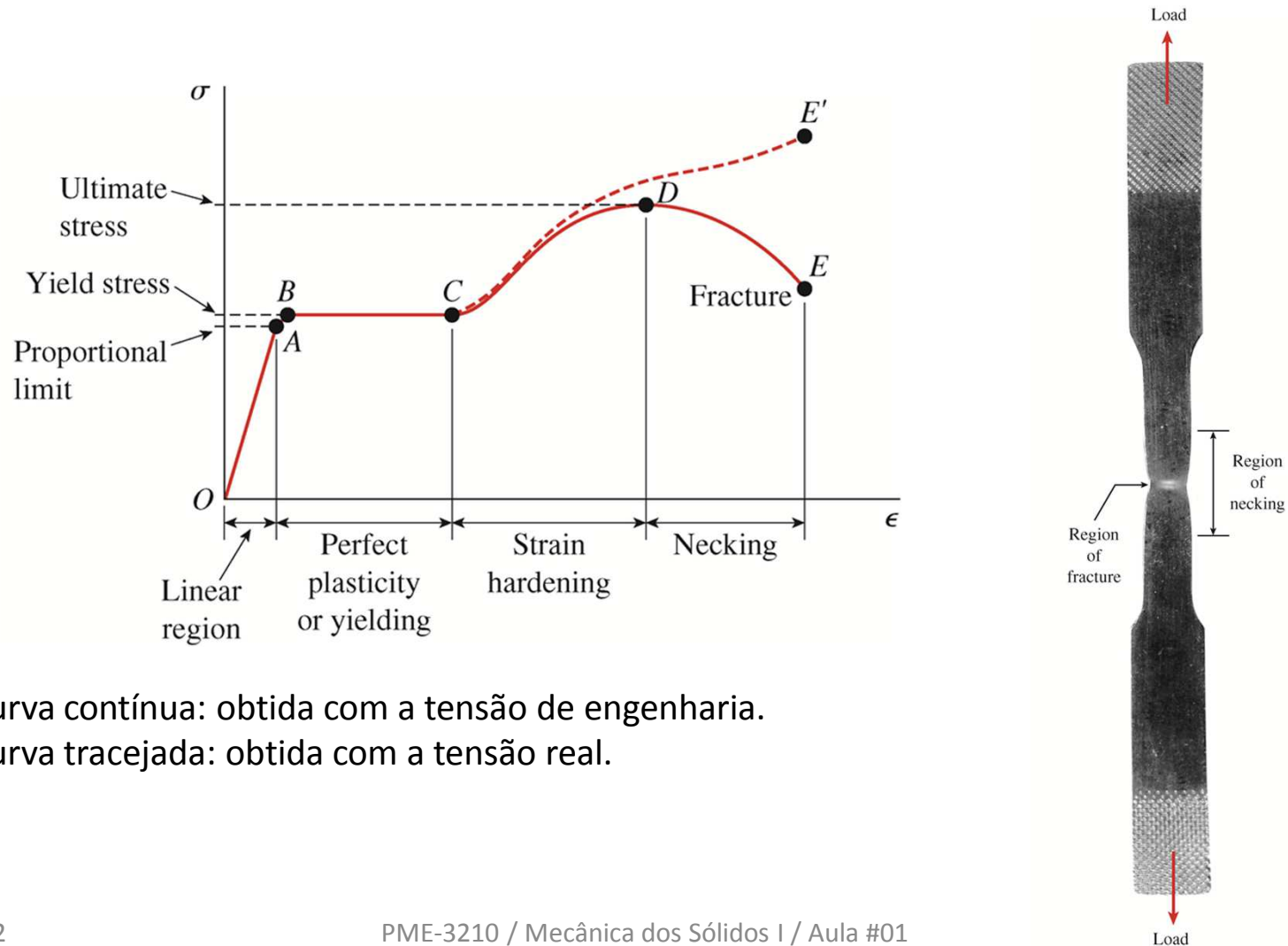


Ensaio de compressão



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

Diagrama Tensão $\times$ Deformação para um aço estrutural típico (sem escala):

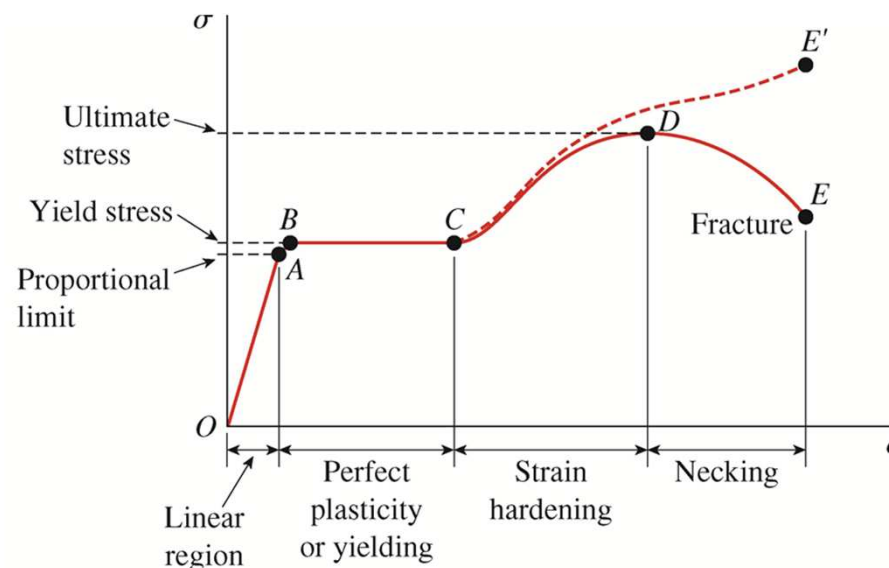


Curva contínua: obtida com a tensão de engenharia.

Curva tracejada: obtida com a tensão real.



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica



Grande parte das estruturas são projetadas para que trabalhem na região de elasticidade linear, onde vale a Lei de Hooke:

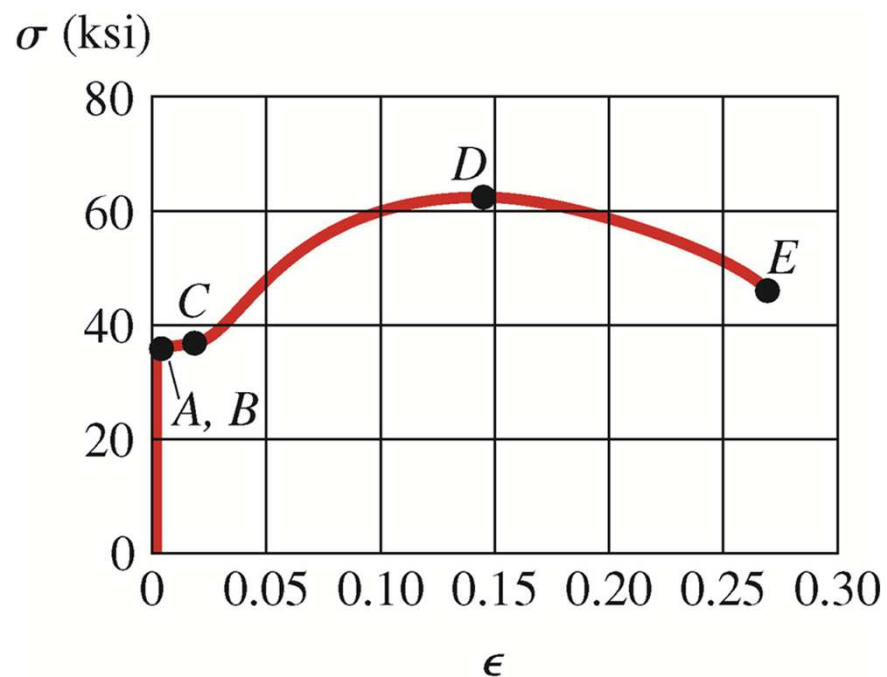
$$\sigma = E\varepsilon$$

Onde E é o módulo de elasticidade do material (ou módulo de Young), que tem a mesma unidade de tensão (no S.I.: $\text{N/m}^2 = \text{Pa}$).



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

Diagrama Tensão $\times$ Deformação para um aço estrutural típico em tração (em escala):

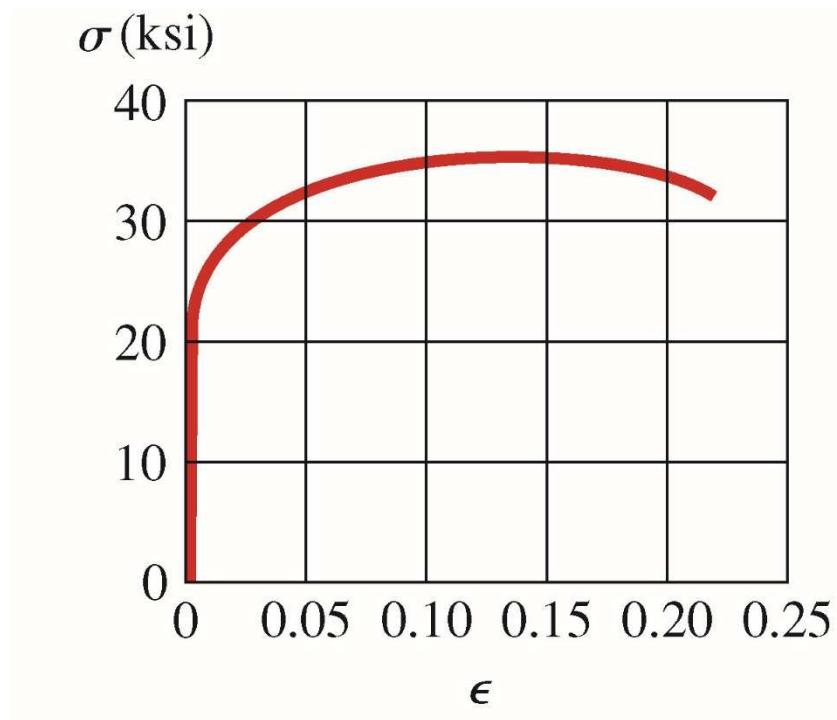


Obs: 36 ksi $\cong$ 250 MPa , 60 ksi $\cong$ 414 MPa



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

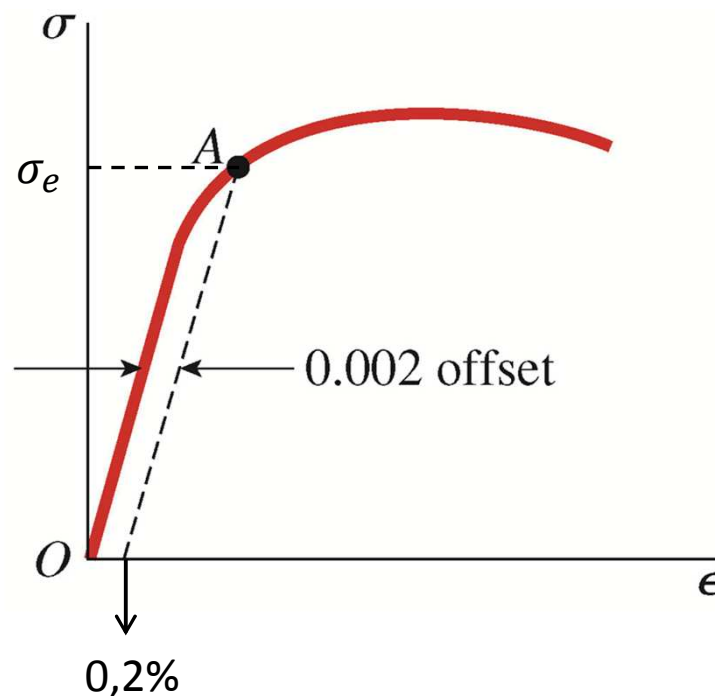
Diagrama Tensão × Deformação típico para uma liga de alumínio (em escala):





Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

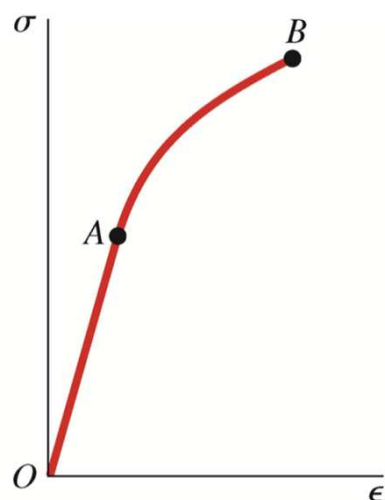
Quando um material (como o alumínio) não tem um ponto de escoamento bem definido, uma tensão de escoamento *arbitrária* é geralmente utilizada nos cálculos:



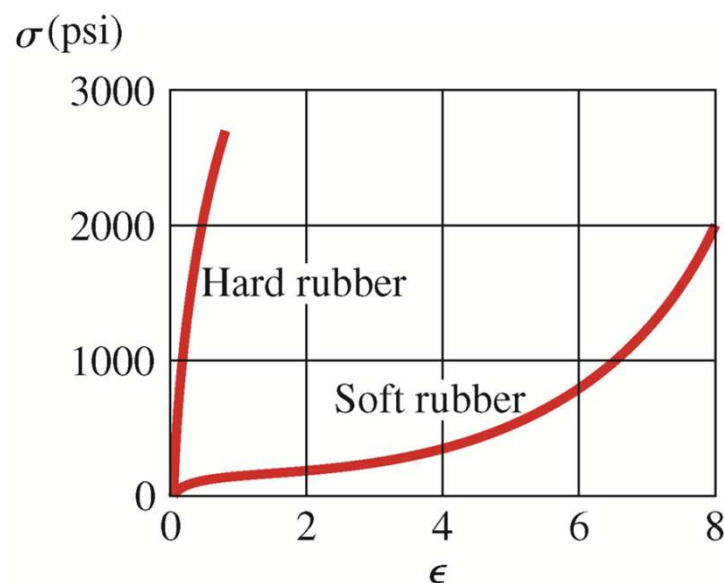


Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

Diagramas Tensão $\times$ Deformação para outros materiais:



(Material com comportamento frágil)
Exemplos:
Ferro fundido, vidro, aço a baixas
temperaturas



(Exemplos de comportamento não-linear)



3.4 Principais Elementos Estruturais

Os elementos estruturais podem ser agrupados segundo várias classificações. Aqui utilizaremos uma classificação baseada nas “dimensões do modelo empregado na representação do elemento estrutural”.

a) Elementos estruturais pontuais (“sem dimensão”):



Fig.7: Exemplos de molas: de tração (à esquerda), de compressão (ao centro), e de torção (à direita).

Quando se deseja determinar apenas o efeito que determinados elementos estruturais proporcionam em outros elementos estruturais (que precisam ser estudados mais detalhadamente), é razoável modelar os primeiros como pontuais (sem dimensão), caracterizando-os apenas pela sua rigidez.



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

b) Elementos estruturais lineares ou unidimensionais:

Tais elementos possuem uma dimensão (comprimento) que é preponderante face às demais dimensões. São exemplos de estruturas lineares:

Cabos: resistem (idealmente) apenas a esforços de tração

Barras: resistem a esforços de tração e compressão

Vigas: resistem a esforços de tração, compressão e a cargas transversais (que geram forças cortantes e momentos fletores)

Colunas: resistem a esforços de compressão, mas também devem resistir a cargas transversais (que geram forças cortantes e momentos fletores nas colunas)

Estruturas formadas apenas por tais elementos são denominadas **estruturas reticuladas**. Neste caso, cada membro da estrutura é representado, de forma simplificada, pelo seu eixo central.



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

c) Elementos estruturais bidimensionais:

São aqueles que possuem duas dimensões preponderantes sobre uma terceira (denominada espessura). Tais estruturas recebem a designação geral de *folhas* e podem ser subdivididas em:

Membranas: resistem (idealmente) apenas a esforços de tração;

Chapas: resistem a esforços aplicados no próprio plano da chapa;

Placas: o “plano” de meia-espessura é descrito por uma superfície plana. Resistem a esforços aplicados no plano e a esforços transversais também;

Cascas: o “plano” de meia-espessura é descrita por uma superfície no espaço. Resistem a esforços aplicados no “plano” de meia-espessura e a esforços transversais também.



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

d) Elementos estruturais tridimensionais:

São aqueles em que as três dimensões possuem as mesmas ordens de grandeza, não havendo alguma que prepondere sobre as demais. Neste caso, os métodos analíticos só oferecem soluções para geometrias e carregamentos bastante simples, sendo necessário o uso de métodos numéricos para a determinação das tensões e deformações nos pontos da estrutura (por exemplo, MEF com o uso de elementos sólidos).



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

Exemplos:

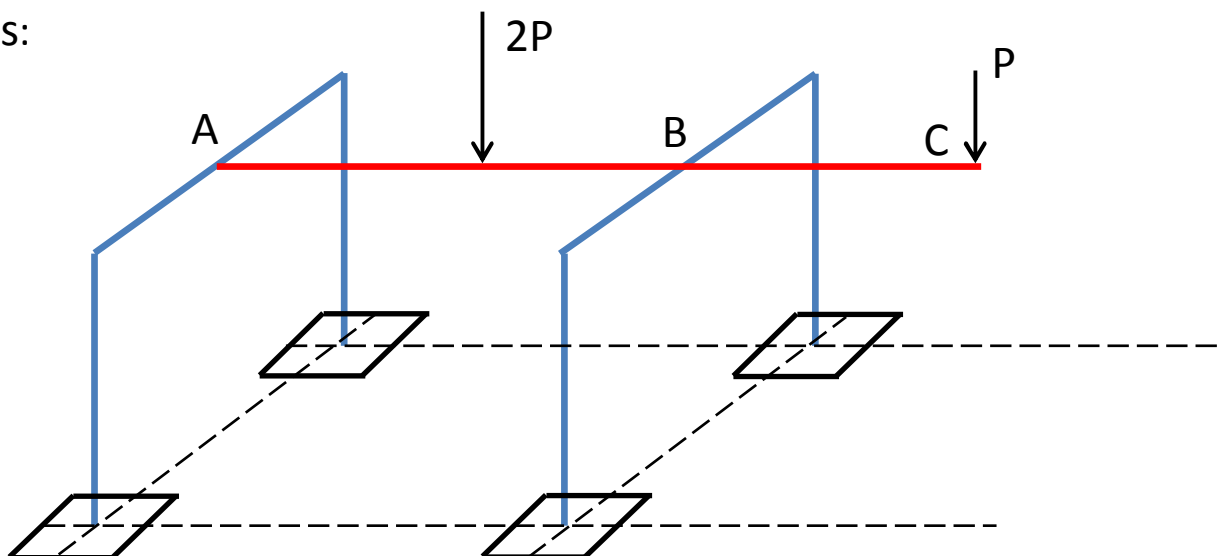


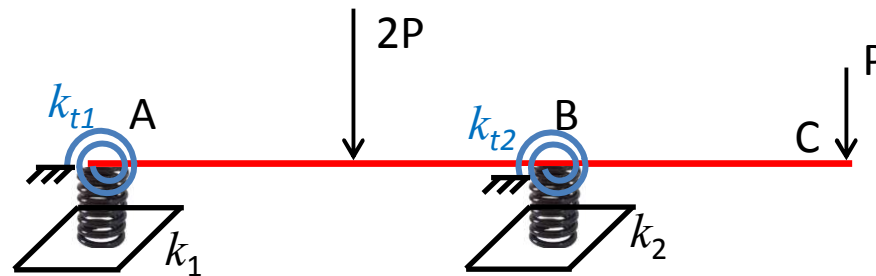
Fig.8: Modelo de uma viga sustentada por dois pórticos.

Se nossa intenção for analisar apenas a viga ABC (ou seja, determinar os esforços e deslocamentos apenas na viga ABC), então podemos substituir os pórticos que a sustentam por molas. Naturalmente, dependendo da forma como as conexões entre viga e pórticos são feitas, podemos ter diferentes modelos como:



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

Modelo 1:



Molas k_1 e k_2 : molas lineares - fornecem uma componente de força proporcional ao deslocamento naquele ponto:

$$|F_i| = k_i |\delta_i|$$

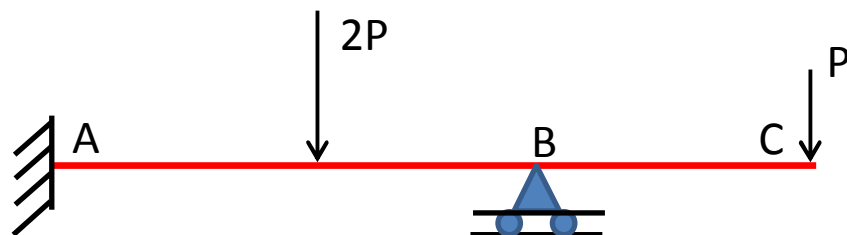
Molas k_{t1} e k_{t2} : molas de torção lineares - fornecem uma componente de momento (binário) proporcional à rotação (giro) da viga naquele ponto:

$$|M_i| = k_{ti} |\theta_i|$$



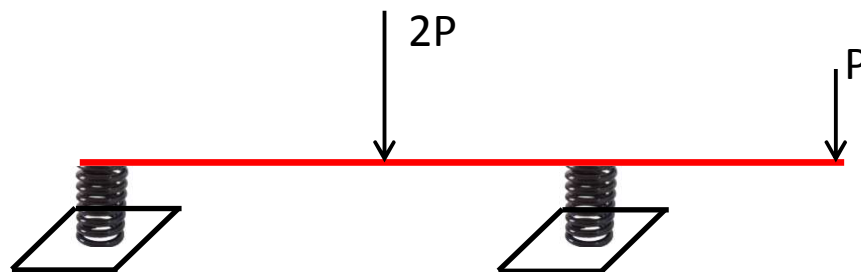
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

Modelo 2:



Equivalente ao modelo 1, mas admitindo que: $k_1 \rightarrow \infty$, $k_2 \rightarrow \infty$,
 $k_{t1} \rightarrow \infty$, $k_{t2} \rightarrow 0$

Modelo 3:



Equivalente ao modelo 1, mas admitindo que: $k_{ti} \rightarrow 0$, $i = 1, 2$

E assim por diante...



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

Exemplos:



Fig.9: Cabos suportando uma ponte estaiada [9].



Fig.10: Ponte Octávio Frias de Oliveira,
Marginal Pinheiros, São Paulo, SP
(Ponte Estaiada) [10].



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

Exemplos:



Fig.11: Estrutura de contenção de resíduos no Rio Madeira, junto à Usina Hidrelétrica de Santo Antônio, Roraima [11].



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

Exemplos:



Fig.12: Treliça metálica formando uma cobertura: barras são submetidas primordialmente a esforços de tração ou compressão, mas a treliça, como um todo, suporta os carregamentos transversais, sendo “equivalente” a uma viga.



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

Exemplos:



Fig.13: Gruas para movimentação de cargas



Fig.14: Torres de transmissão de energia elétrica



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

Exemplos:



Fig.15: Ponte rolante submetida a esforços transversais



Fig.16: A viga-navio: bom modelo para a determinação das tensões primárias



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

Exemplos:



Fig.17: Estruturas na construção civil.



Fig.18: Estruturas na construção naval.



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

Exemplos:



Fig.19: Estruturas de membrana.



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

Exemplos:



Fig.20: Os vidros utilizados nesta construção, se submetidos apenas ao peso próprio, podem ser modelados como chapas. Se submetidos a esforços transversais (p.ex., pressão devida ao vento) devem ser modelados como placas.



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

Exemplos:



Fig.21: Estruturas que podem ser modeladas como cascas (reforçadas) [12,13].



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

Exemplos:



Fig.22: Estruturas na forma de cascas
(cilíndricas ou esféricas).



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

Exemplos:



Fig.23: Exemplos de estruturas tridimensionais:
válvula de esfera, rolamento e engrenagem cônica.



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

Referências:

- [1] Gere, J.M., Goodno, B.J. Mecânica dos Materiais – Tradução da 7ª edição norte-americana. Cengage Learning, 2010, 860p, Capítulo 1.
- [2] https://pt.wikipedia.org/wiki/Engenharia_estrutural
- [3] <https://www.manutencaoemfoco.com.br/analise-de-falhas/>
- [4] Bueno, A.F.B. Avaliação das armaduras de tração de riser flexível durante ensaios axiais de tração e fadiga. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2010, 155p
- [5] <https://www.heliusenergy.com.br/avaliacao-previa-dos-telhados-antes-da-instalacao-dos-sistemas-fv/>
- [6] <http://inspecaoequipto.blogspot.com/2014/02/caso-060-avioes-comet-falhas-por-fadiga.html>
- [7] <http://publish.ucc.ie/boolean/2010/00/dePaor/11/en>
- [8] Custódio, A.B. Modelo Analítico para Estimativa da Falha por Instabilidade em Armaduras de Dutos Flexíveis. Tese (Doutorado). COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005, 161p.



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

Referências:

- [9] <https://www.classcentral.com/report/edx-dartmouth-engineering-of-structures-around-us/>
- [10] https://pt.wikipedia.org/wiki/Ponte_Octávio_Frias_de_Oliveira
- [11] <http://g1.globo.com/ro/rondonia/noticia/2017/03/usina-cria-sistema-para-manter-curso-natural-dos-troncos-no-rio-madeira.html>
- [12] <https://marsemfim.com.br/submarinos-maiores-do-mundo/>
- [13] <https://www.flightglobal.com/boeing-nears-end-of-further-787-revision/88614.article>