

Departamento de Engenharia Mecânica  
Mecânica dos Sólidos II



# Critérios de Escoamento

Prof. Arthur Braga

# Projeto Mecânico

## Estratégia

- Identificar possíveis modos de falha (escoamento, ruptura, fadiga, fratura, etc.)
- Definir critério de falha e aplicar fator de segurança apropriado para obter tensão (deformação) limite de projeto
- Identificar carregamentos relevantes, *e.g.*, pressão interna, peso próprio, expansão térmica, etc.

# Projeto Mecânico

## Estratégia

- Calcular tensões (deformações) produzidas pelos carregamentos relevantes
- Comparar tensões (deformações) calculadas com os limites aceitáveis
- No projeto mecânico voltado para a integridade estrutural deve-se evitar condições que favoreçam a degradação do material (*e.g.*, corrosão)

# Integridade Estrutural (a)

- Considera-se que uma estrutura está íntegra quando ela pode suportar os carregamentos de operação e teste com uma probabilidade mínima de falha durante o tempo que se pretende operá-la.
- A falha impede que o componente, máquina, equipamento ou estrutura exerça sua função estrutural. As falhas podem ser catastróficas ou não catastróficas.
- Define-se como falha catastrófica aquela que ocorre sem aviso prévio e envolve grande parte da estrutura.
- A falha não catastrófica é previsível e geralmente envolve grandes deformações plásticas, empenos pronunciados, trincas que se propagam por grandes extensões durante um tempo grande e eventualmente pode ser monitorada.

(a) Material reproduzido das notas de aula do Prof. J. L. Freire (*Integridade Estrutural*)

# Integridade Estrutural (a)

<b>Tipo de Falha Estrutural</b>	<b>Característica</b>
Instabilidade Elástica	Flambagem catastrófica
Deformação elástica excessiva	Não catastrófica
Deformação plástica excessiva	Limite de escoamento é ultrapassado. Provoca empenos, estrição, rótula plástica, etc.
Ruptura por tração subsequente à deformação plástica excessiva	Provoca vazamentos bruscos por perda de contenção
Falha por acumulação progressiva de dano	Propagação de trincas ou perda de material no tempo. Fadiga, Fluência, Desgaste, Erosão, Corrosão (várias formas).
Falha por transformação microestrutural progressiva	Grafitização, esferoidização, descarbonetação, etc..
Fratura catastrófica	Aparência frágil, iniciação não perceptível

(a) Material reproduzido das notas de aula do Prof. J. L. Freire (*Integridade Estrutural*)

# Integridade Estrutural <sup>(a)</sup>

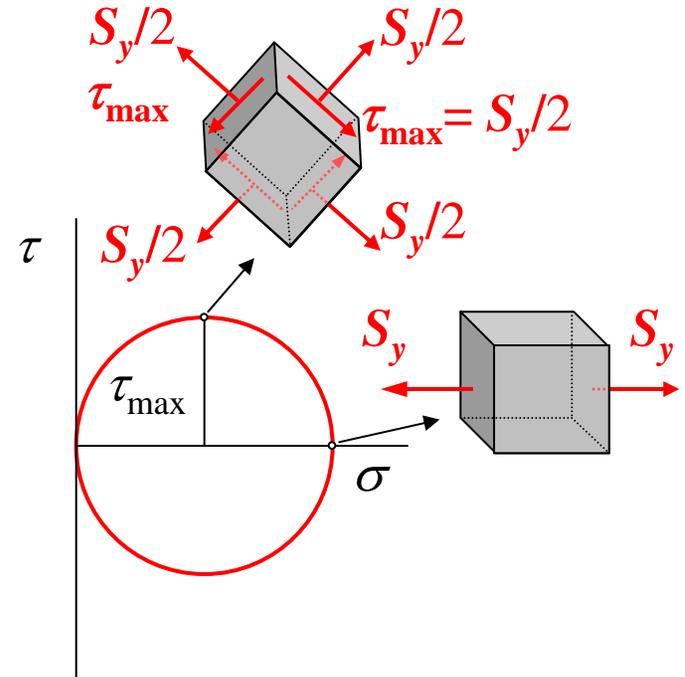
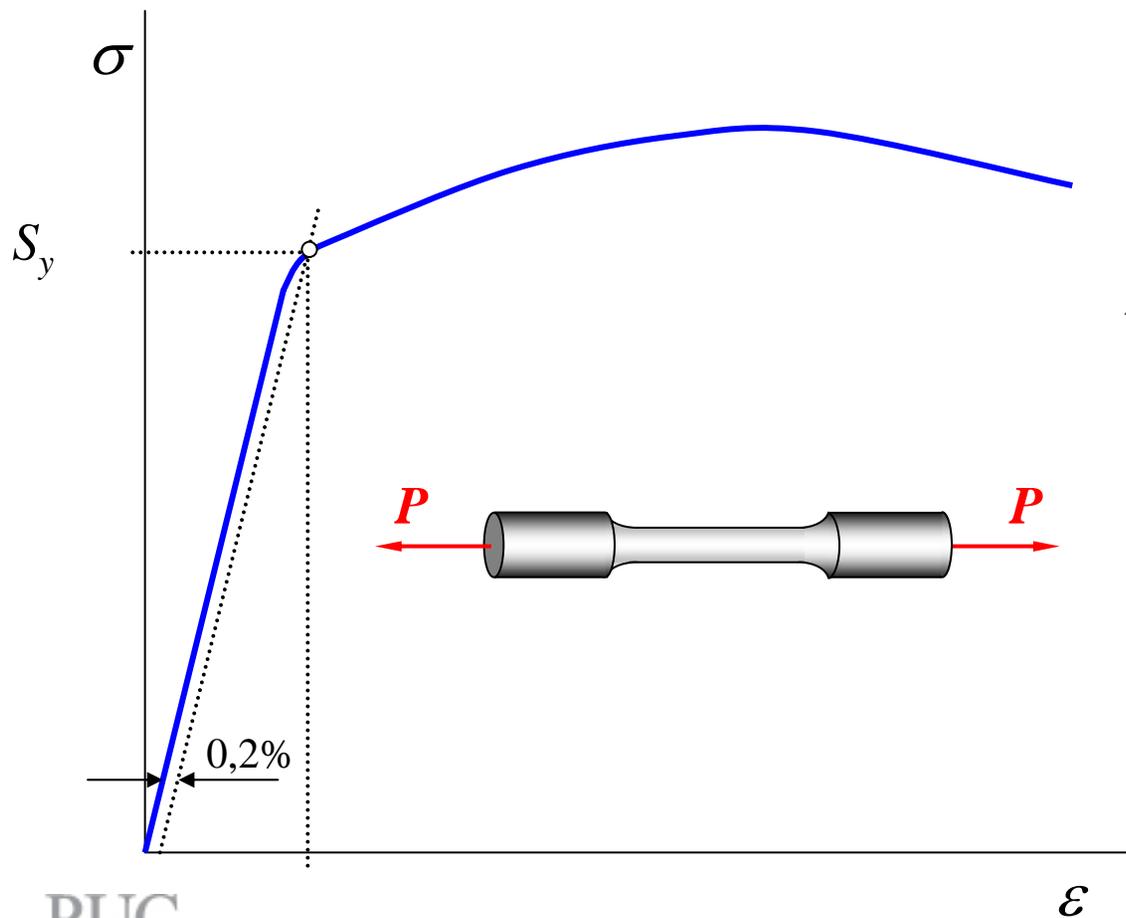
## Falhas Estruturais sob Condições Estáticas

- *Excessiva deformação plástica*: ocorre para os materiais dúcteis.
- *Fratura*: ocorre para os materiais dúcteis e frágeis. As fraturas podem ter aparência:
  - **Dúctil**: Apresenta aspecto com textura fibrosa, desenvolvendo estrição e grandes deformações plásticas.
  - **Frágil**: Apresenta aspecto granular e não evidencia estrição ou deformações plásticas acentuadas sob observação macroscópica

(a) Material reproduzido das notas de aula do Prof. J. L. Freire (*Integridade Estrutural*)

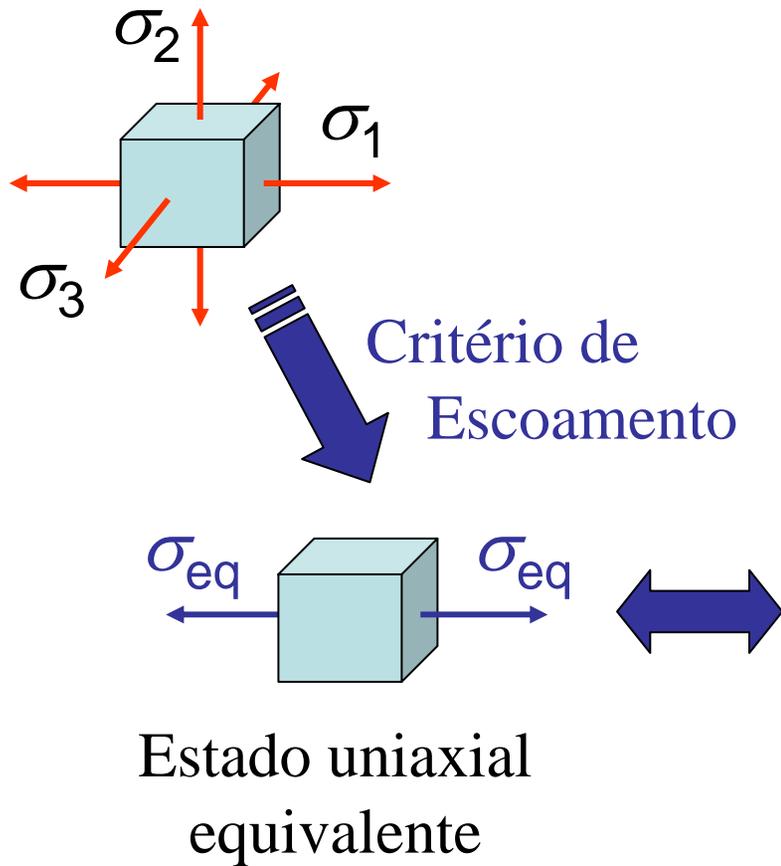
# Critérios de Falha por Escoamento

## Ensaio de Tração

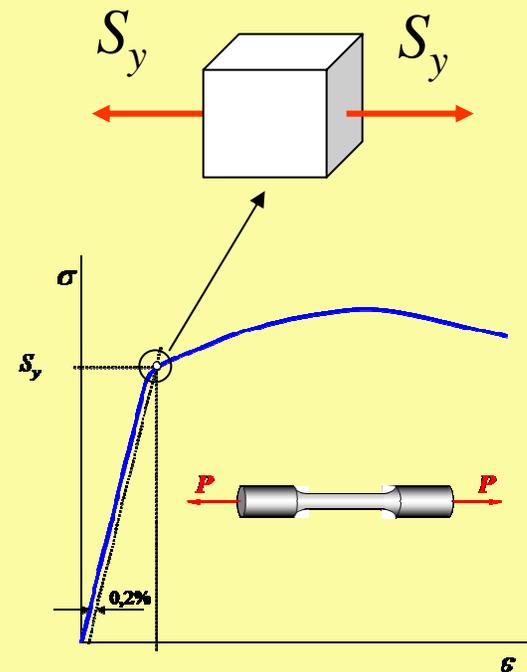


# Critérios de Falha por Escoamento

Estado 3D de tensão



Início do escoamento  
no ensaio de tração



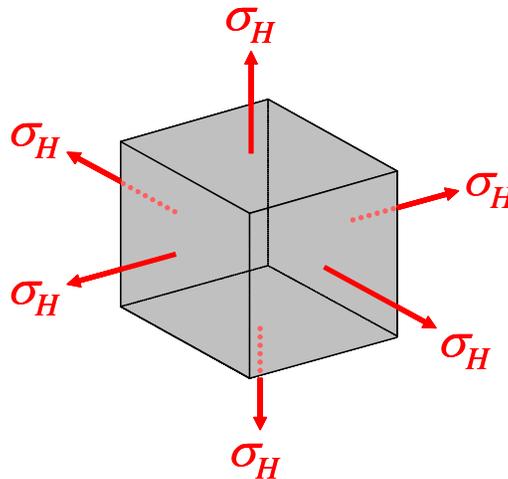
# Critérios de Falha por Escoamento

## Considerações

- O estado de tensão num ponto é completamente descrito pela magnitude e orientação das tensões principais
- Para um material isotrópico, a orientação das direções principais não influencia o início do escoamento. Assim, *o critério deve considerar apenas as magnitudes das tensões principais.*

# Critérios de Falha por Escoamento

- Pode-se verificar experimentalmente que o *estado de tensão hidrostático* não influencia o início do escoamento



- O critério deve *basear-se nas diferenças entre as tensões principais* e não nas suas magnitudes, de forma que tensões hidrostáticas se cancelem e não influenciando o início do escoamento.

# Critérios de Falha por Escoamento

## Critério de von Mises

Num ponto sujeito a um estado de tensão triaxial, o escoamento se inicia quando a *média quadrática das diferenças* entre as três tensões principais se iguala a verificada no início do escoamento do ensaio de tração

$$\begin{aligned} & \sqrt{\frac{1}{3} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]} \\ & = \sqrt{\frac{1}{3} [(s_y - 0)^2 + (s_y - 0)^2 + (0 - 0)^2]} = \sqrt{\frac{2}{3}} s_y \end{aligned}$$

# Critérios de Falha por Escoamento

## Critério de von Mises

*Tensão de von Mises*

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]}$$

De acordo com o critério de von Mises, o material se comporta elasticamente quando

$$\sigma_{VM} < S_y$$

# Critérios de Falha por Escoamento

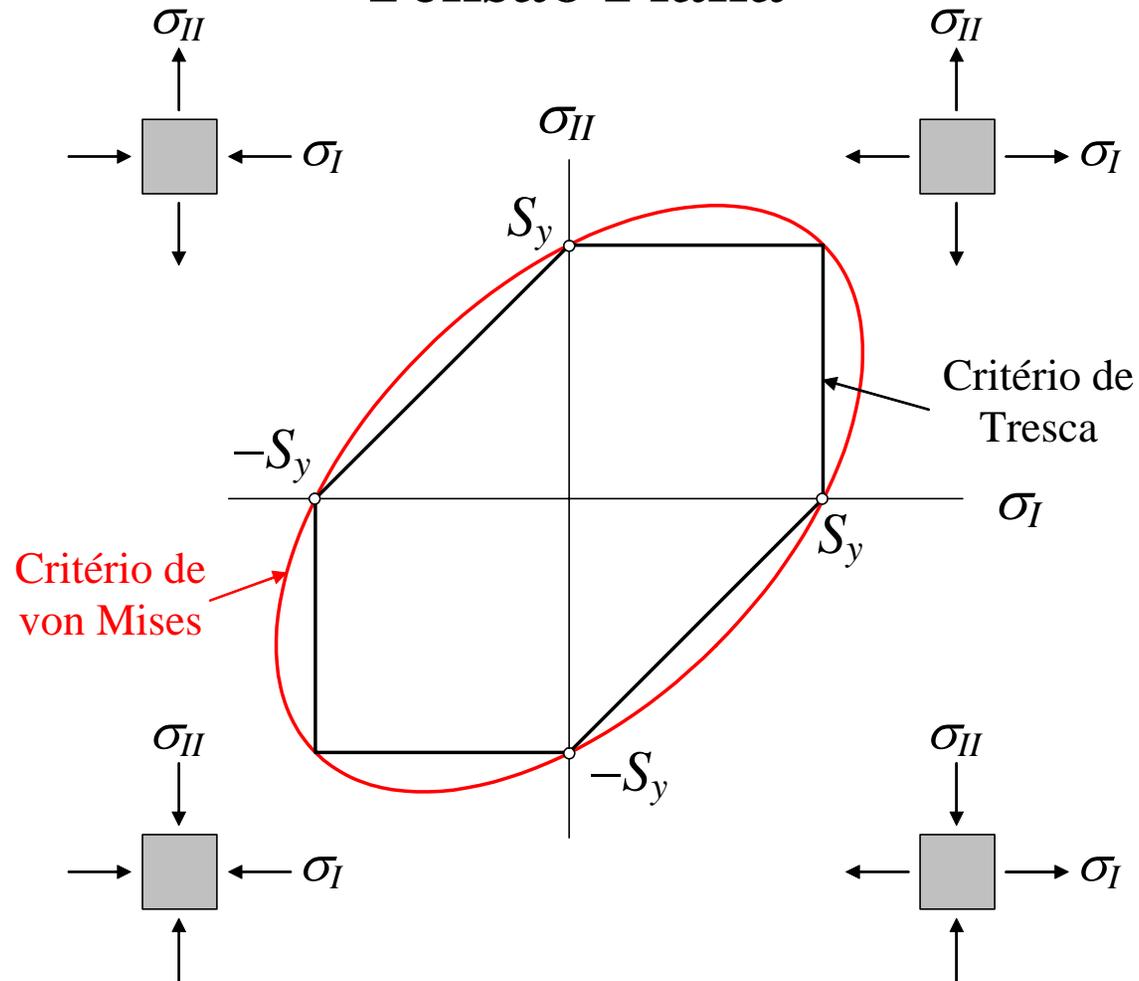
## Critério de Tresca (Máxima Tensão Cisalhante)

Deformações plásticas ocorrem num ponto do material quando a máxima tensão cisalhante atinge o valor da máxima tensão cisalhante que causa o início do escoamento no ensaio de tração

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{S_y}{2}$$

# Critérios de Falha por Escoamento

## Tensão Plana



# Critérios de Falha por Escoamento

Exemplo: Vaso de pressão

$$\sigma_1 = \sigma_{\theta\theta} = \frac{PD}{2t}$$

$$\sigma_2 = \sigma_{zz} = \frac{PD}{4t}$$

$$\sigma_3 \approx 0, \quad \left( \sigma_3 = -P \ll \frac{PD}{2t} \right)$$

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{PD}{4t}$$

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{PD}{2t}$$

Tresca :  $\tau_{\max} < \frac{S_y}{2} \Rightarrow P_{\max} = \frac{2tS_y}{D}$

von Mises :  $\sigma_{VM} < S_y \Rightarrow P_{\max} = 1.16 \frac{2tS_y}{D}$

