UFABC – UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC

CECS – CENTRO DE ENGENHARIA, MODELAGEM E CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS

ENGENHARIA AEROESPACIAL

ESTS010-17 - TÉCNICAS DE ANÁLISE ESTRUTURAL E PROJETO

-Terceiro Quadrimestre – 2022 -

Prof. Dr. Wesley Góis – CECS - UFABC

São Bernardo do Campo, setembro de 2022

1. Teoria de Falhas

Projetos de máquinas, veículos e estruturas buscam:

- *Níveis máximos de desempenho;*
- *Economia;*
- *Segurança;*
- *Durabilidade.*

A fim de assegurar segurança, durabilidade e bom desempenho, é necessário que sejam evitados principalmente:

- *Tensões e deformações excessivas;*
- *Surgimento de trincas (propagação e fratura).*

- O comportamento mecânico dos materiais é o estudo das tensões, deformações e trincas nesses materiais.

Critérios de Resistência

Universidade Federal do ABC

PROJETO ESTRUTURAL DE UM COMPONENTE: a fim de evitar falhas estruturais, deve garantir que a tensão no componente não exceda a RESISTÊNCIA DO MATERIAL.

RESISTÊNCIA DO MATERIAL: nível de tensão que causa falha, qualquer que seja o mecanismo da falha.

CONSIDERAÇÕES EM UM PROJETO ESTRUTURAL:

- Entre outras, as seguintes considerações devem ser feitas durante um projeto estrutural:
  - Estados de tensão uni-axiais, bi-axiais ou tri-axiais;
  - Presença de falhas ou trincas de diversos tamanhos;
  - Tensões aplicadas por períodos longos (carga estática);
  - Tensões aplicadas ciclicamente (fadiga).

Critérios de Resistência

Universidade Federal do ABC

TIPOS DE FALHAS ESTRUTURAIS:

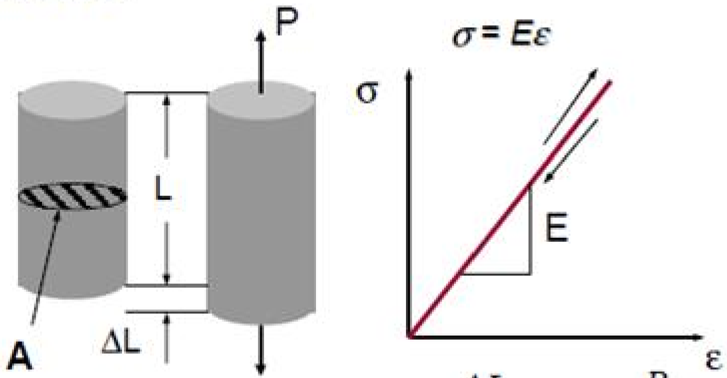
FALHA POR DEFORMAÇÃO: modificação da forma ou dimensões de um componente estrutural suficiente para causar perda de sua função;

FRATURA: quebra de um componente em duas ou mais partes devido à presença de trincas.

MODOS BÁSICOS DE FALHA ESTRUTURAL:

Deformação:	**Independente do tempo:**	**- Elástica** **- Plástica**
	Dependente do tempo:	**- Fluência**
Fratura:	**Carregamento estático:**	**- Frágil** **- Dútil** **- Ambiental** **- Fluência**
	Carregamento cíclico (fadiga):	**- Alto ciclo** **- Baixo ciclo** **- Propagação por fadiga** **- Corrosão por fadiga**

DEFORMAÇÕES ELÁSTICAS E PLÁSTICAS:



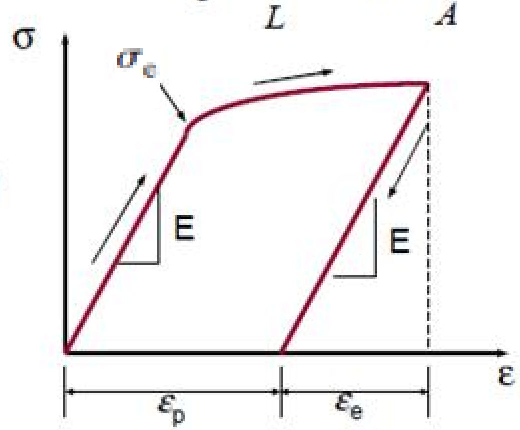
$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \qquad \sigma = \frac{P}{A}$$

DEFORMAÇÕES ELÁSTICAS

- Recuperação imediatamente após a remoção do carregamento
- Tensões e deformações proporcionais
- Constante de proporcionalidade para tensão axial: MÓDULO DE ELASTICIDADE (E)

DEFORMAÇÕES PLÁSTICAS

- Não são recuperadas durante o descarregamento → são deformações permanentes.
- Início das deformações plásticas (ESCOAMENTO) → pequenos acréscimos de tensões resultam em grandes aumentos de deformações.
- Tensão de escoamento (notação): σ_e



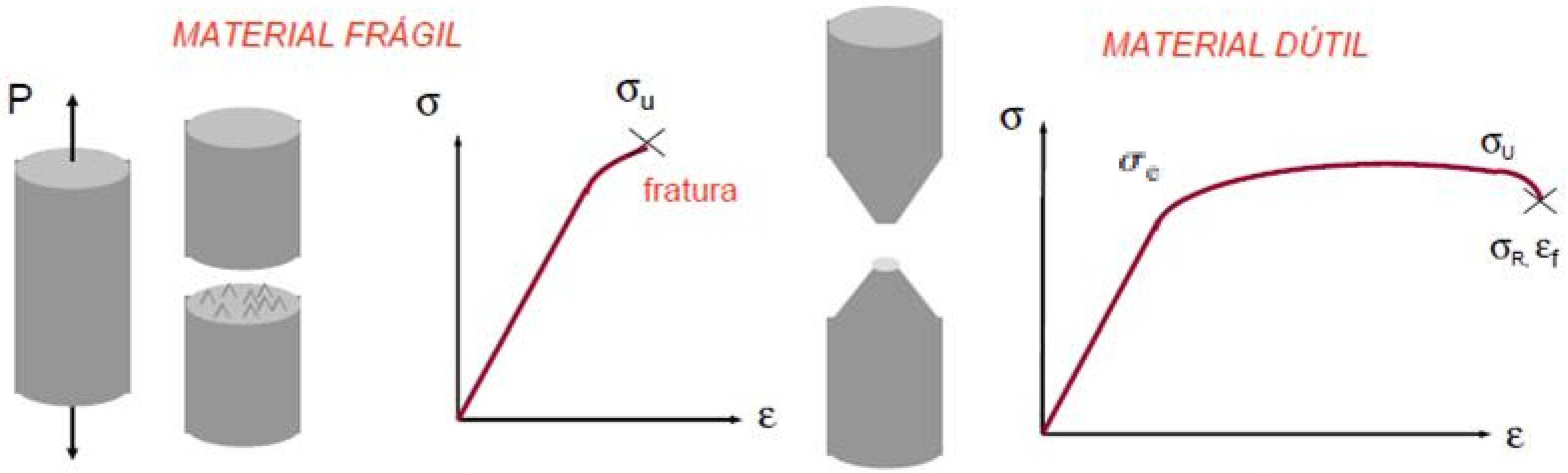
Critérios de Resistência

TIPOS DE MATERIAIS:

DÚTEIS: materiais capazes de acumular níveis elevados de deformação plástica (ex: aços de baixa resistência, cobre, chumbo etc.)

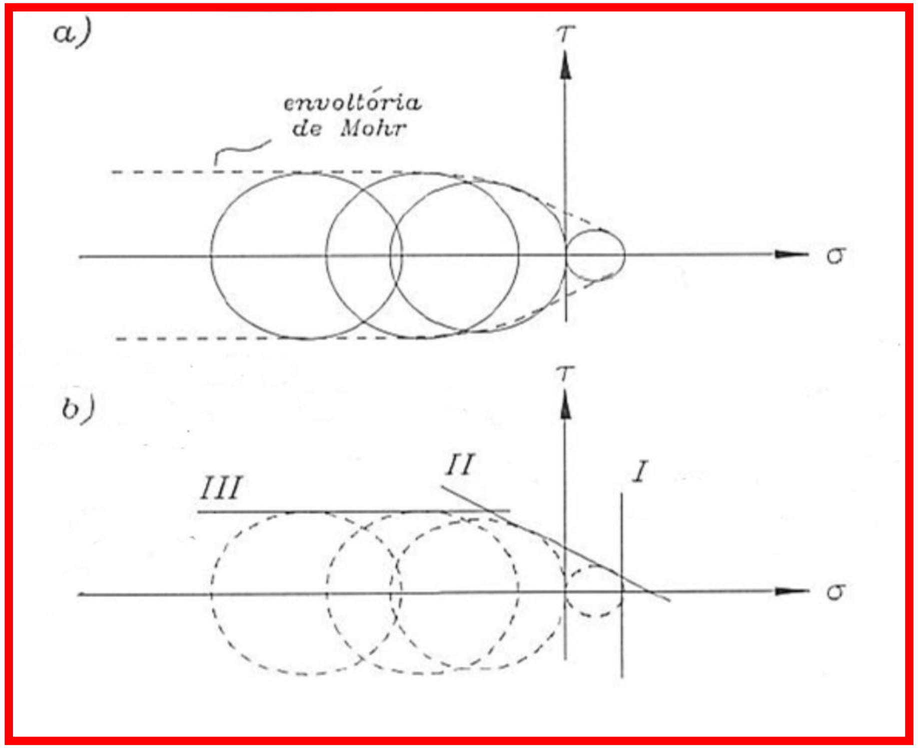
FRÁGEIS: fraturam com baixos níveis de deformação plástica (aços de alta resistência, vidro, pedra, acrílico etc.)

ENSAIOS DE TRAÇÃO: avaliação da resistência e da ductibilidade de materiais.



Do ensaio obtém-se: tensão de escoamento (σ_e), tensão máxima (σ_u), tensão de ruptura (σ_R) e deformação específica na ruptura ("elongation" – ε_f)

1.1 Envoltória de Mohr



Falha para material *dúctil* cororre pelo *escoamento*, ao passo que se for *frágil*, isso ocorrerá pela *ruptura*.

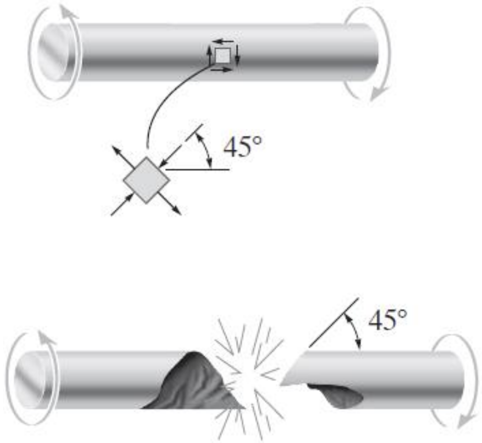
1.2 Critério da máxima tensão normal

- ***Teoria da tensão normal máxima*** afirma que esses materiais tendem a falhar repentinamente por ruptura,quando ocorre a tensão de tração máxima.

$$|\sigma_1| = \sigma_r$$
$$|\sigma_2| = \sigma_r$$

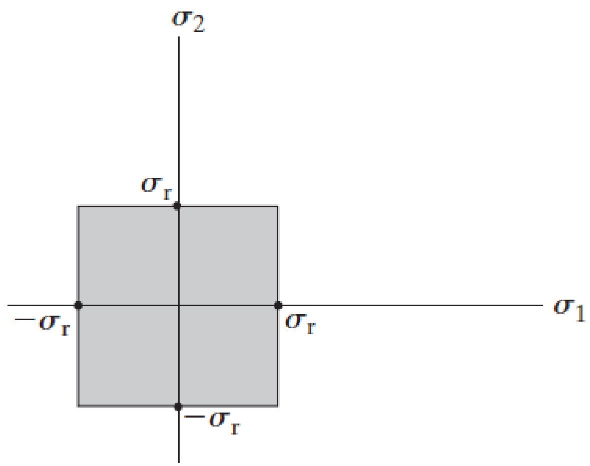
Falha de um material frágil sob tração

(a)



Falha de um material frágil sob torção

(b)



Teoria da tensão normal máxima

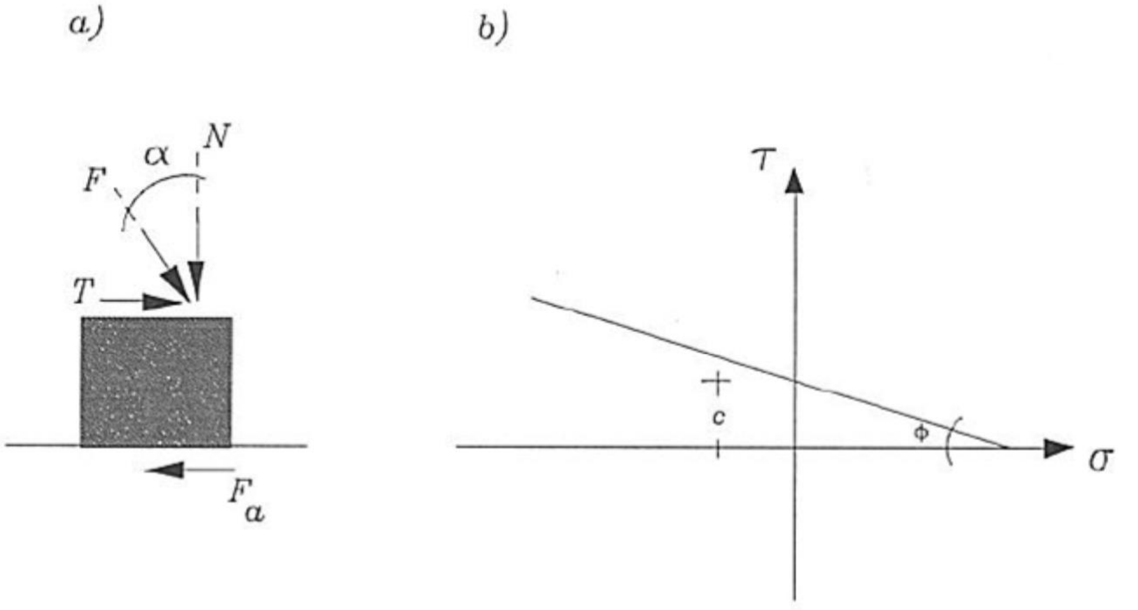
1.3 Critério de Mohr-Coulomb

- Este critério deriva da adoção do trecho II da envoltória de Mohr linearizada como limitante de estados de tensão adimissíveis. Portanto, a combinação das tensões normal e de cisalhamento é a responsável pela ruptura.
- ***A proporcionalidade entre as componentes de tensão, admitida pelo critério, é bastante razoável e pode ser justificada pela analogia com o modelo simples de escorregamento de um sólido sobre uma superfície com atrito***.

Critérios de Resistência

$$N = -F\cos\alpha \quad ; \quad T = F\,sen\,\alpha$$

$$F_a = \mu N = -\mu F\cos\alpha$$



a) escorregamento do sólido com atrito
b) envoltória linearizada.

Critérios de Resistência

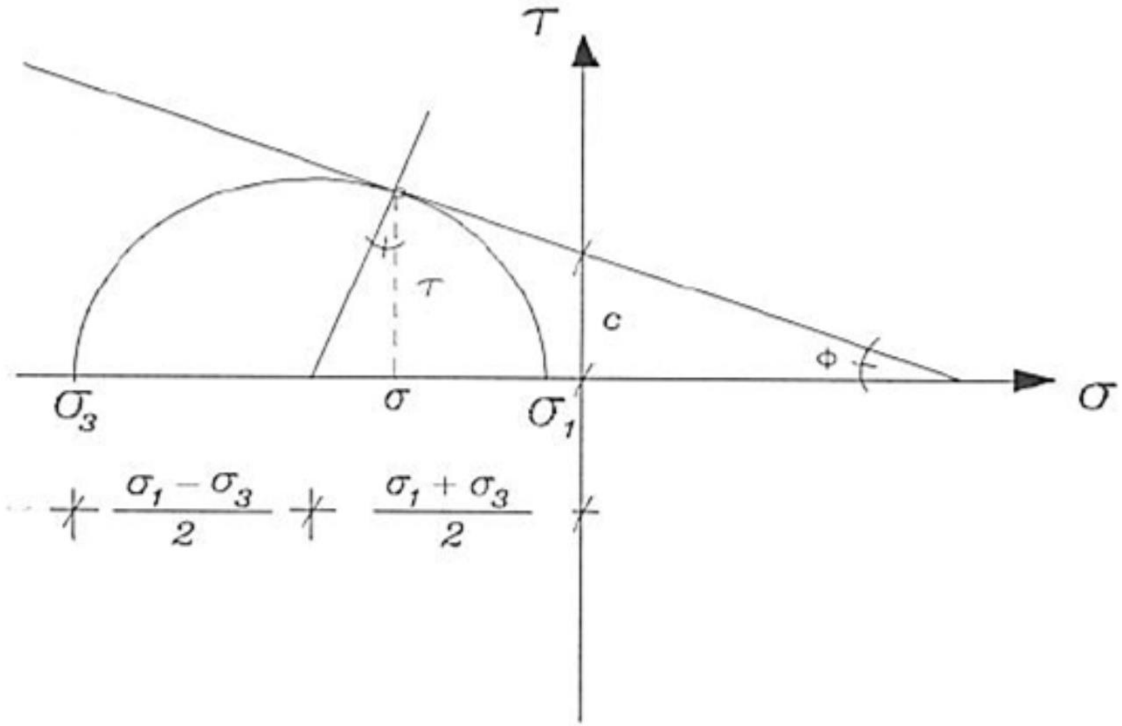
$$F_a = \mu\, N = -\mu F \cos\alpha$$ → Força de atrito

$$F\, sen\alpha = -\mu\; F \cos\alpha \quad \rightarrow \quad -tg\,\alpha = \mu$$

Ű= -ůtg**ű**

Ű≤ −ůtg(ű)   Ű≤ −ůtg(ű) + c

Critérios de Resistência



Estado de tensão crítico genérico

Critérios de Resistência

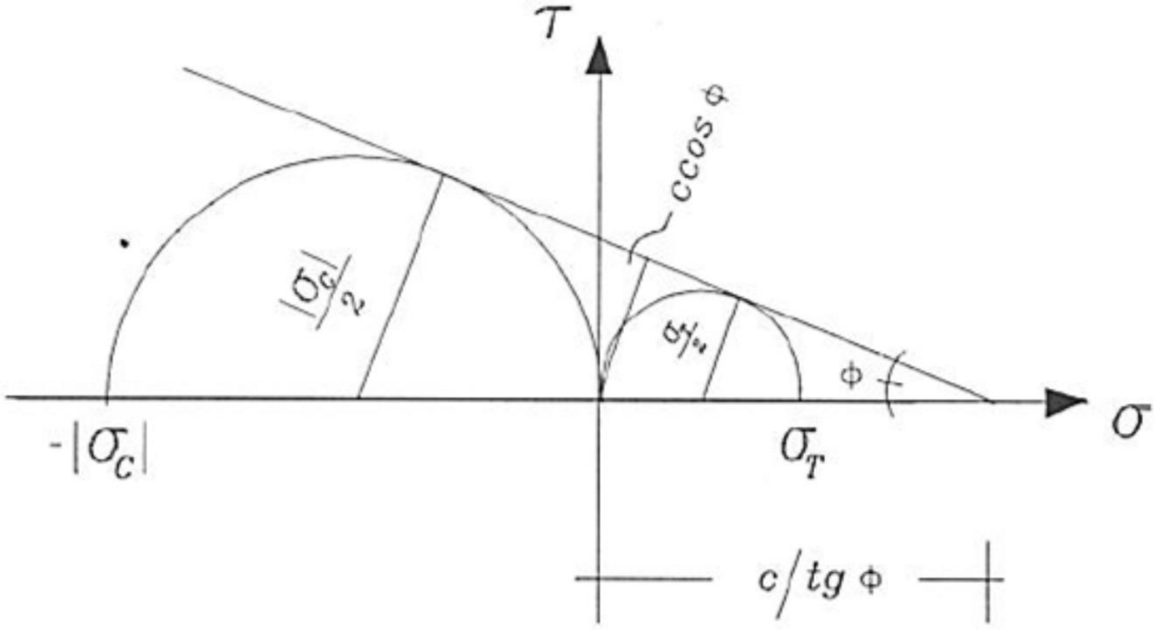
Universidade Federal do ABC

$$\tau = -\frac{(\sigma_3 - \sigma_1)}{2}\cos\phi$$

$$\sigma = \frac{(\sigma_3 + \sigma_1)}{2} - \frac{(\sigma_3 - \sigma_1)}{2}sen\phi$$

$$\frac{\sigma_1(1 + sen\phi)}{2c\cos\phi} - \frac{\sigma_3(1 - sen\phi)}{2c\cos\phi} \leq 1$$

Critérios de Resistência



Relação entre parâmetros do critério

Critérios de Resistência

Universidade Federal do ABC

$$sen\,\phi = \frac{\sigma_T}{2\left(\dfrac{c}{tg\phi} - \dfrac{\sigma_T}{2}\right)} \quad ; \quad sen\,\phi = \frac{|\sigma_C|}{2\left(\dfrac{c}{tg\phi} + \dfrac{|\sigma_C|}{2}\right)}$$

$$\sigma_T = \frac{2\,c\cos\phi}{(1 + sen\,\phi)} \quad ; \quad |\sigma_C| = \frac{2\,c\cos\phi}{(1 - sen\,\phi)}$$

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_T} - \frac{\sigma_3}{|\sigma_C|} \leq 1$$

$$m\frac{\sigma_1}{|\sigma_C|} - \frac{\sigma_3}{|\sigma_C|} \leq 1 \qquad \text{sendo} \qquad m = \frac{|\sigma_C|}{\sigma_T}$$

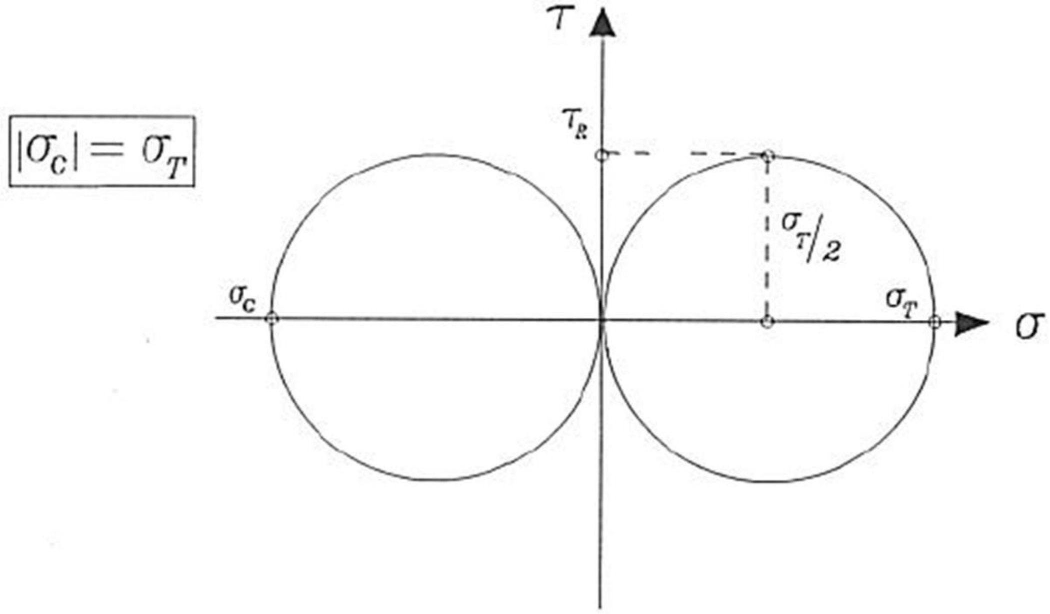
Universidade Federal do ABC

1.4 Critério de Tresca

- O *escoamento do material dúctil*, acontece ao longo dos planos de contato dos cristais orientados aleatoriamente e que formam o material.

- ***Este critério aplica-se a materiais dúcteis, que tenham as resistência à tração e à compressão uniaxiais praticamente iguais*. *Ele também deriva da analogia com o trecho III da envoltória de Mohr linearizada, adotado como limitante de estados de tensão admissíveis pelo material. Portanto, estados hidróstáticos de tensão não levam à ruptura, sendo a mesma provocada pela tensão de cisalhamento ou, de outro modo, por desvios daqueles estados.***

Critérios de Resistência



$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \leq \tau_R$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 \leq \sigma_T$$

Critérios de Resistência

Universidade Federal do ABC

$$(\sigma_y = \sigma_z = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0)$$

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x}{2} + \sqrt{(\frac{\sigma_x}{2})^2 + \tau_{xy}^{\ 2}}$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_x}{2} - \sqrt{(\frac{\sigma_x}{2})^2 + \tau_{xy}^{\ 2}}$$

$$\sigma_i = 2\sqrt{(\frac{\sigma_x}{2})^2 + \tau_{xy}^{\ 2}} = \sqrt{\sigma_x^{\ 2} + 4\tau_{xy}^{\ 2}} \leq \sigma_T$$

1.4 Critério de von Mises

- *O critério de von Mises, ou Critério da Máxima Energia de Distorção, é também dedicado à análise dos materiais de comportamento dúctil.*

- ***Analogamente ao critério de Tresca, postula-se que estados hidrostáticos de tensão não provocam ruptura. Esta acontece quando a energia de distorção capaz de ser absorvida no processo de deformação atinge um valor limite de referência.***

Critérios de Resistência

Universidade Federal do ABC

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} = [A] + [B] = \begin{bmatrix} \sigma_m & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_m & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma_1 - \sigma_m & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 - \sigma_m & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 - \sigma_m \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{bmatrix} = [C] + [D] = \begin{bmatrix} \varepsilon_m & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_m & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 - \varepsilon_m & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 - \varepsilon_m & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 - \varepsilon_m \end{bmatrix}$$

Critérios de Resistência

$$u = \frac{1}{2}(\sigma_1\varepsilon_1 + \sigma_2\varepsilon_2 + \sigma_3\varepsilon_3) = u_V + u_D$$

$$u_D = \frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_m)\cdot(\varepsilon_1 - \varepsilon_m) + (\sigma_2 - \sigma_m)\cdot(\varepsilon_2 - \varepsilon_m) + (\sigma_3 - \sigma_m)\cdot(\varepsilon_3 - \varepsilon_m)]$$

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E}[\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)] \quad ; \quad \varepsilon_2 = \frac{1}{E}[\sigma_2 - \nu(\sigma_1 + \sigma_3)]$$

$$\varepsilon_3 = \frac{1}{E}[\sigma_3 - \nu(\sigma_2 + \sigma_1)]$$

$$u_D = \frac{1+\nu}{6E}\left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2\right]$$

Critérios de Resistência

Universidade Federal do ABC

$$\sigma_1 = \sigma_T \;;\; \sigma_2 = \sigma_3 = 0$$

$$u_D = \frac{1+\nu}{6E}\left[(\sigma_T)^2 + (\sigma_T)^2\right] = \frac{1+\nu}{3E}\sigma_T^2$$

$$\frac{1+\nu}{6E}\left[(\sigma_1-\sigma_2)^2 + (\sigma_1-\sigma_3)^2 + (\sigma_2-\sigma_3)^2\right] \le \frac{1+\nu}{3E}\sigma_T^2$$

$$\frac{1}{2}\left[(\sigma_1-\sigma_2)^2 + (\sigma_1-\sigma_3)^2 + (\sigma_2-\sigma_3)^2\right] \le \sigma_T^2$$

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_x{}^2 + 3\tau_{xy}{}^2} \le \sigma_T$$

Fadiga sob Efeito de Cargas Cíclicas

Fadiga é o processo que conduz à falha do material pela aplicação repetida de um determinado carregamento. A prevenção de fratura por fadiga é uma preocupação essencial no projeto de máquinas e elementos estruturais.

<u>Fadiga de Alto Ciclo</u>: o nº de repetições (ciclos) necessárias para causar falha por fadiga é da ordem de *milhões de ciclos*. Deformações elásticas são predominantes. A abordagem utilizada é a *S-N* ("stress-life")

<u>Fadiga de Baixo Ciclo</u>: o nº de repetições (ciclos) necessárias para causar falha por fadiga é da ordem de *dezenas, centenas ou milhares de ciclos*. As deformações plásticas serão significativas. A abordagem utilizada é a ε-*N* ("strain-life")