ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Elementos de Máquinas para Automação

PMR 3307 – A06

Introdução a falha por fadiga mecânica

2020.2

Cronograma de aulas

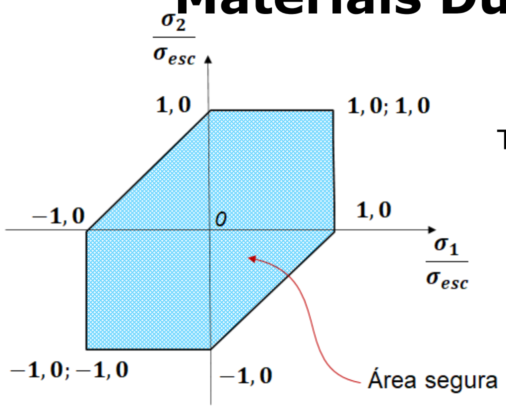
Dia	S	Aula	Tópico	Prof.
18.08	3ª	A1	**Introdução a disciplina** Modelagem, carregamento e equilíbrio	RS
21.08	6ª	A2	Comportamento mecânico dos materiais	RS
25.08	3ª	A3	Composição de tensões Estado plano de tensões – Círculo de Mohr	RS
28.08	6ª	A4	Teorias de Falha: 1) Falha por deformação excessiva; fundamentos	RS
01.09	3ª	A5	Teorias de Falha: 2) Falha por deformação permanente: von Mises, Tresca, Coulomb-Mohr;	RS
04.09	6ª	A6	Teorias de Falha: 3) Falha por fadiga: Parte - 1	RS
08.09	3ª	A7	Teorias de Falha: 3) Falha por fadiga: Parte - 2	RS
11.09	6ª	A8	Teorias de Falha: 4) Falha por instabilidade: flambagem	RS
15.09	3ª	A9	Teorias de Falha: 5) Falha por impacto: Parte - 1	RS
18.09	6ª	A10	Teorias de Falha: 6) Falha por impacto: Parte - 2	RS
22.09	3ª	A11	Teorias de Falha: 6) Falha por desgaste excessivo	RS
25.09	6ª	A12	Fixações cubo-eixo	NG
29.09	3ª	A13	Especificação e dimensionamento de elementos de fixação: Rebites	NG
02.10	6ª	A14	Especificação e dimensionamento de elementos de fixação: Parafusos: Parte - 1	NG
06.10	3ª	A15	Especificação e dimensionamento de elementos de fixação: Parafusos: Parte - 2	NG
09.10	6ª	A16	Especificação e dimensionamento de elementos de transmissão: Fusos	NG
13.10	3ª	A17	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Mancais: Parte - 1	NG
16.10	6ª	A18	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Mancais: Parte - 2	NG
20.10	3ª	A19	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Molas: Parte - 1	NG
23.10	6ª	A20	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Molas: Parte - 2	NG
27.10	3ª	A21	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Freios e embreagens	NG
30.10	6ª	A22	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Correias e Correntes	NG
03.11	3ª	A23	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Engrenagens: Parte - 1	RS
06.11	6ª	A24	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Engrenagens: Parte - 2	RS
10.11	3ª	A25	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Engrenagens: Parte - 3	RS
13.11	6ª	A26	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Engrenagens: Parte - 4	RS
17.11	3ª	---	**Feriado municipal – Consciência Negra**	
20.11	6ª	A27	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Guias de escorregamento	RS
24.11	3ª	A28	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Guias lineares	RS
27.11	6ª	A29	Apresentação dos trabalhos	RS
01.12	3ª	A30	Apresentação dos trabalhos	
04.12	6ª	A29	Apresentação dos trabalhos	
08.12	3ª	A30		
11.12	6ª	A31		
14.12	2ª		**Encerramento do semestre 2020-2**	

Tópicos

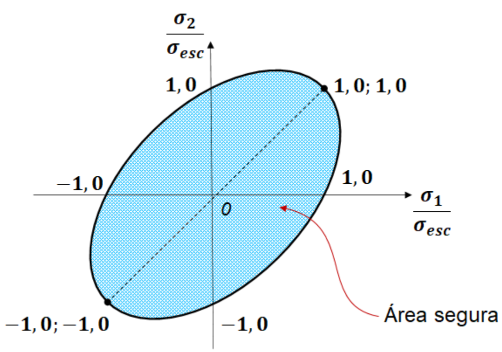
- Introdução
- Concentradores de tensões
- Fratura Mecânica

teoria de falha

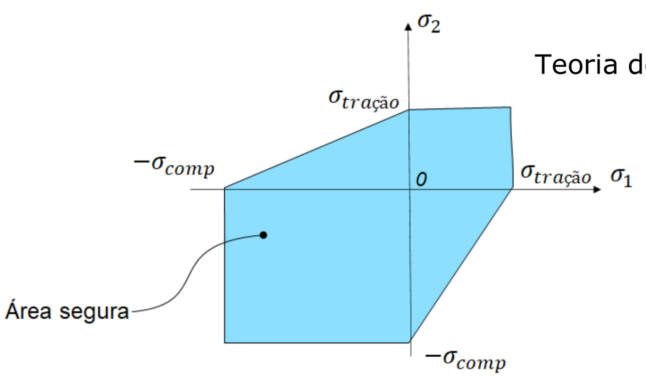
Materiais Dúcteis



Teoria de Tresca

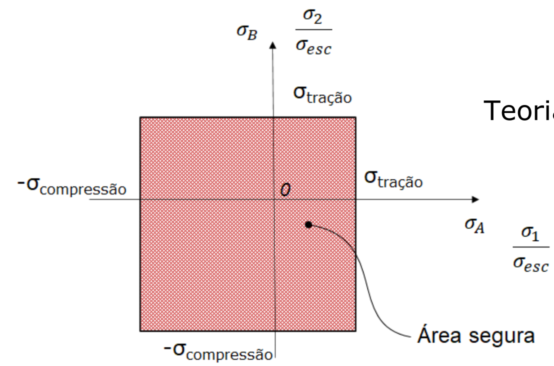


Teoria de v. Misses

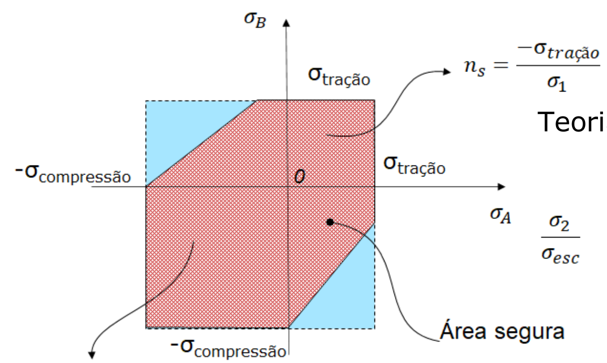


Teoria de Coulomb-Mohr

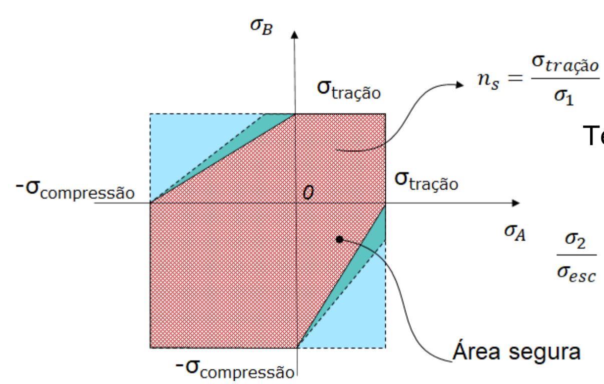
Materiais Frágeis



Teoria da Máxima Tensão Normal



Teoria de Mohr Modificada

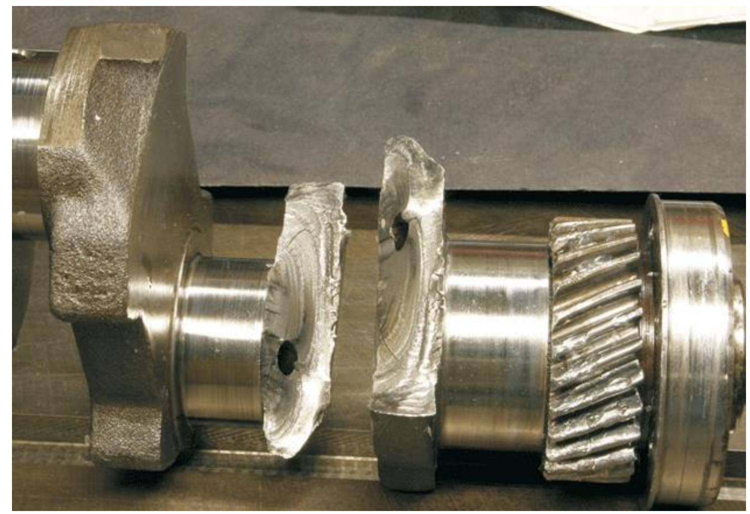


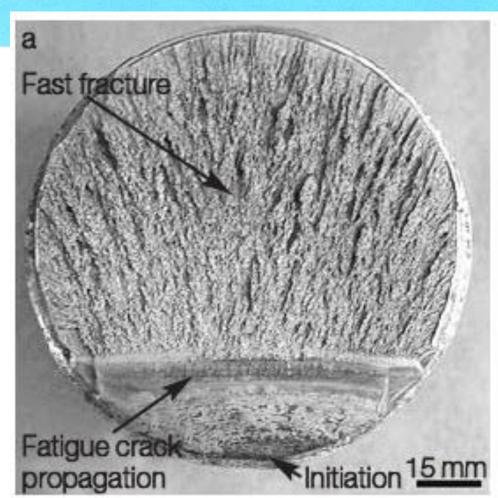
Teoria de Coulomb-Mohr

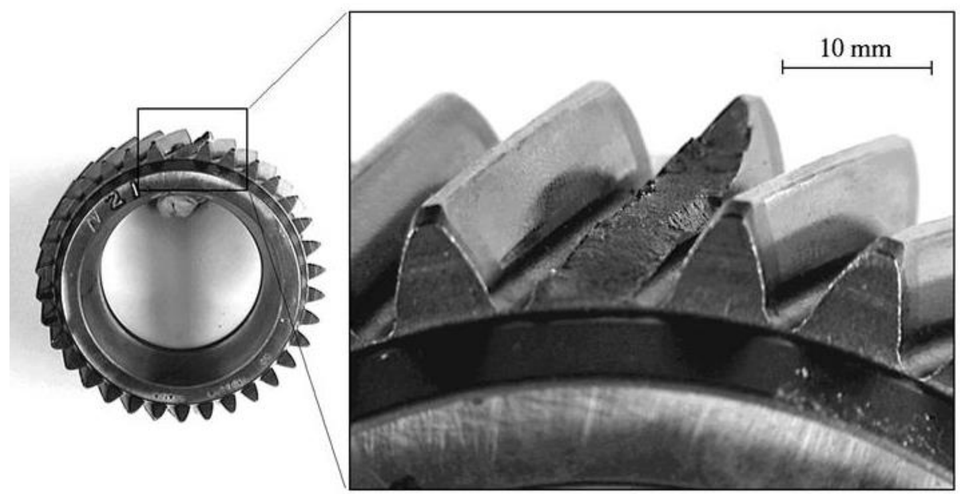
Introdução a falha por fadiga mecânica

Introdução a falha por fadiga mecânica

Falha por fadiga mecânica

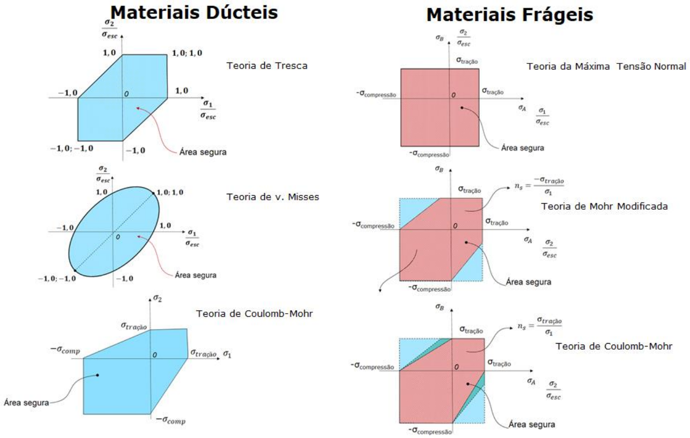






Concentradores de tensões

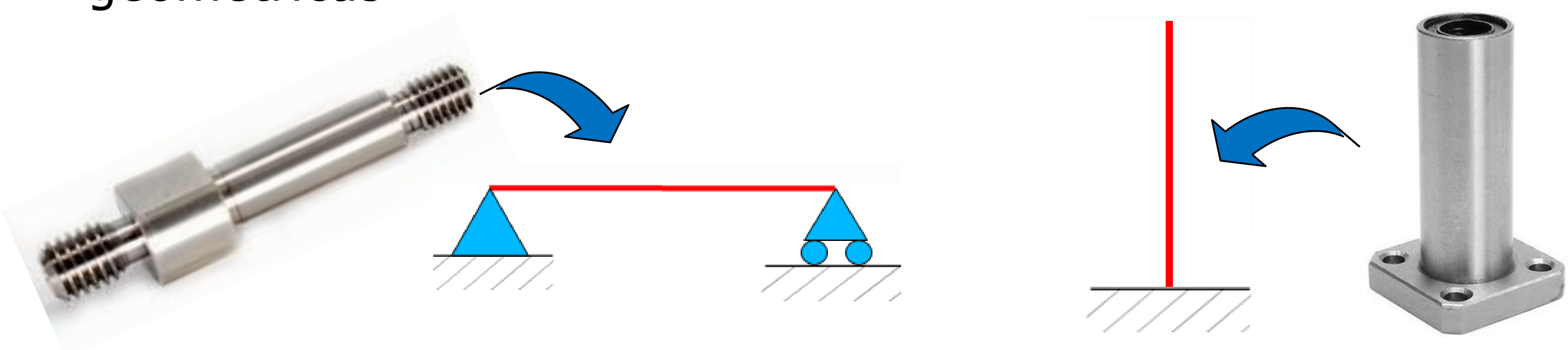
- Até agora todos os nossos problemas consideraram carregamentos estáticos e elementos sem irregularidades geométricas
- As tensões eram calculadas nos diversos componentes e peças estruturais através das expressões da Mecânica dos Sólidos. Essa apresentava valores nominais de tensões e deformações válidos apenas se forem satisfeitas uma série de condições



http://grante.ufsc.br/download/Fadiga/FADIGA-Livro-Edison-da-Rosa.pdf

Concentradores de tensões

- Até agora todos os nossos problemas consideraram carregamentos estáticos e elementos sem irregularidades geométricas

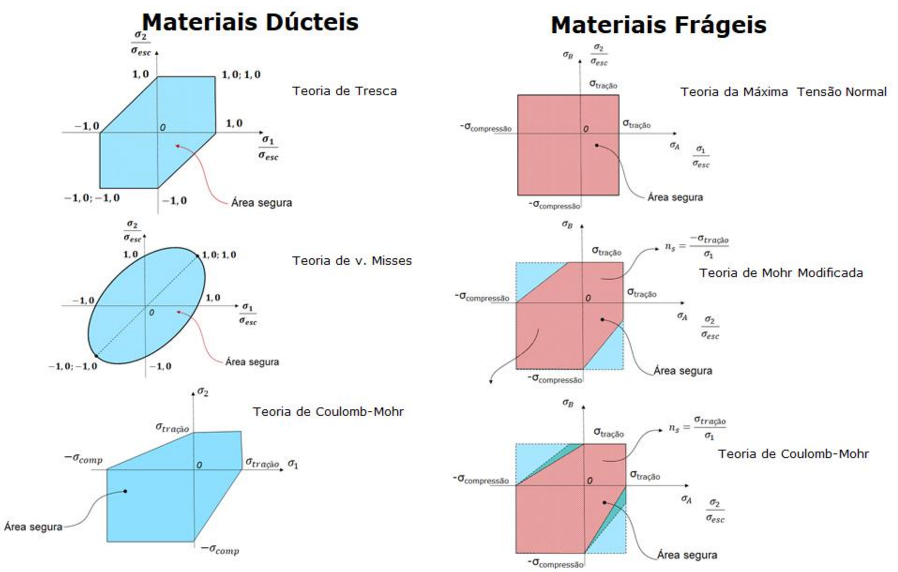


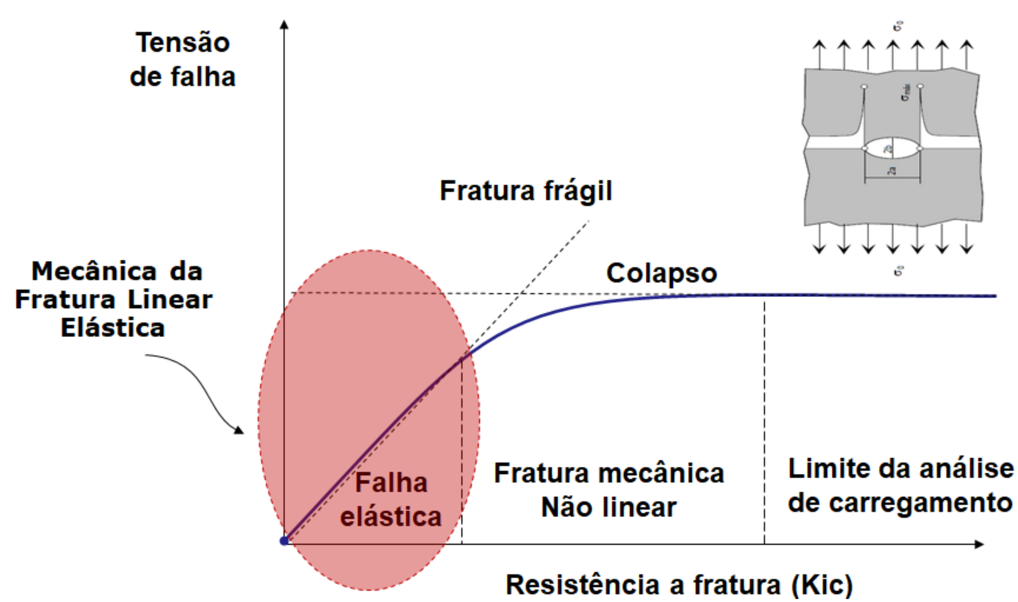
- A maior parte dos elementos de máquinas apresentam variações de geometria, ou detalhes que permitam montagens, fixações, etc. Essas são regiões com maior probabilidade de falha, o que faz com que a distribuição de tensões fique perturbada

http://grante.ufsc.br/download/Fadiga/FADIGA-Livro-Edison-da-Rosa.pdf

Concentradores de tensões

- Até agora as tensões eram calculadas nos diversos componentes e peças estruturais através das expressões da Mecânica dos Sólidos. Essa apresentava valores nominais de tensões e deformações válidos apenas se forem satisfeitas uma série de condições

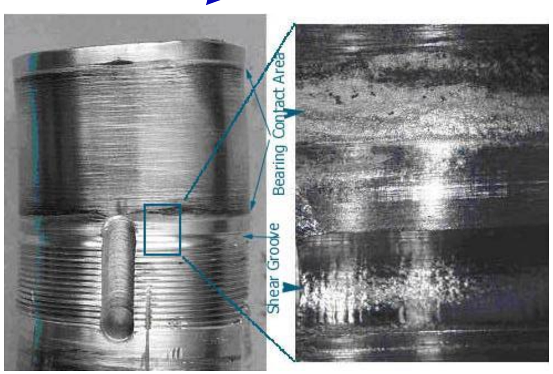




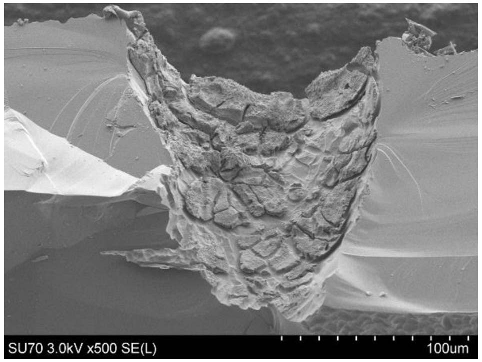
Concentradores de tensões

Origens

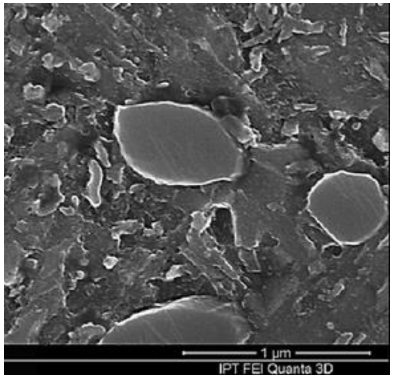
Detalhes geométricos



Macro danos superficiais (Ex.: Trincas, temperas localizadas, deformações plásticas, outros)

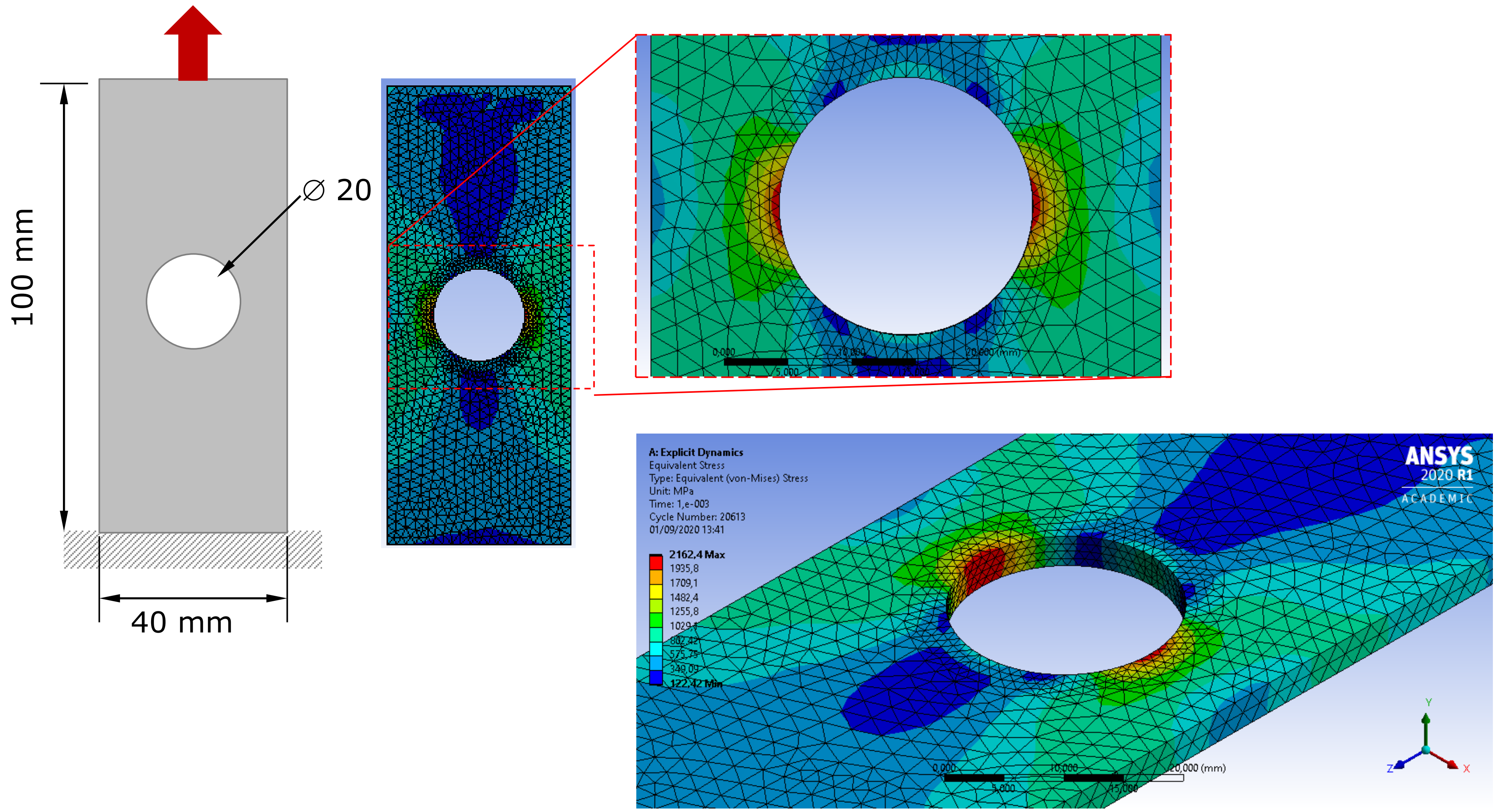


Micro danos superficiais (Ex.: Trincas, pitch, delaminações, outros)



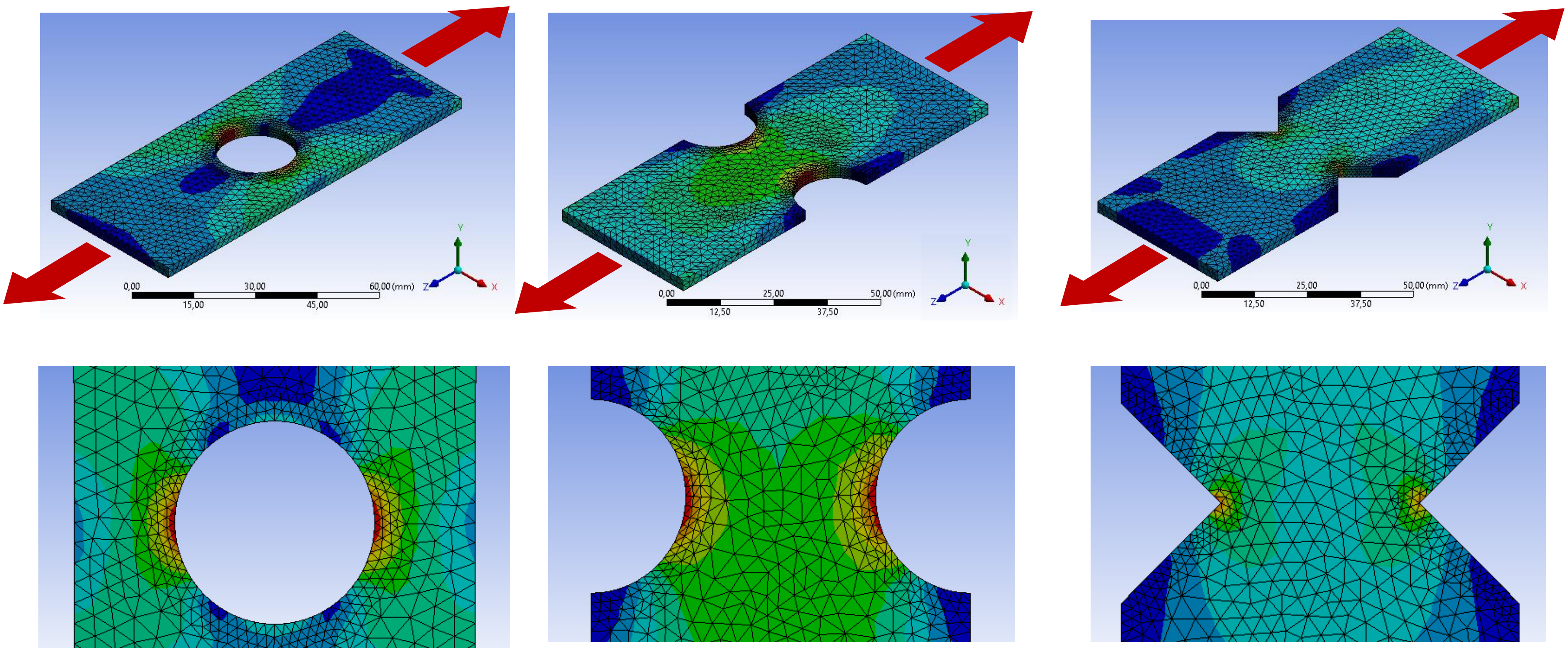
Presença de fases duras na microestrutura (Ex.: Carbonetos, Nitretos, Óxidos, outros)

Concentradores de tensões



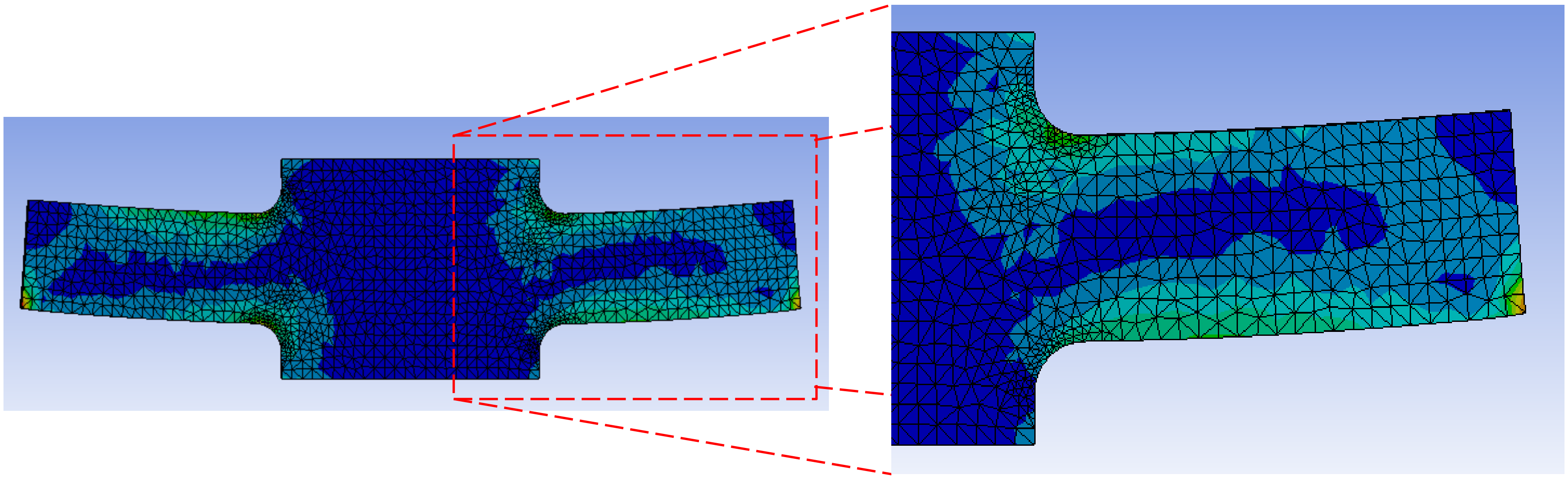
Concentradores geométricos de tensões

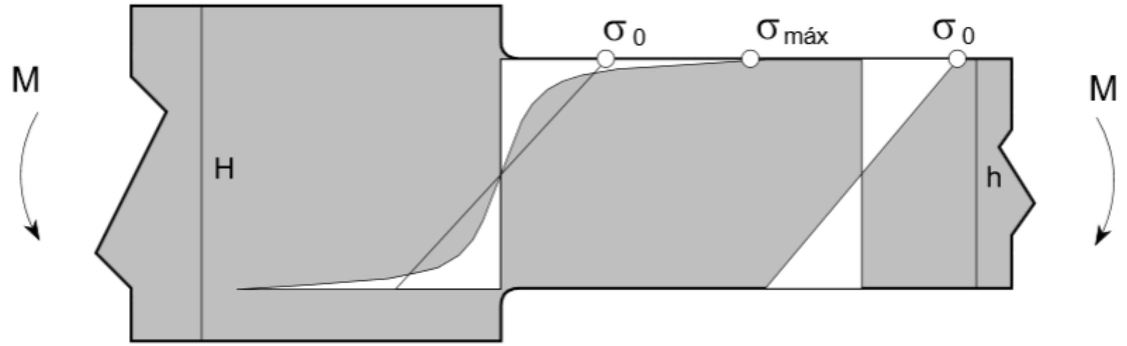
- Exemplos de componentes com de regiões com concentração de tensão



Concentradores de tensões

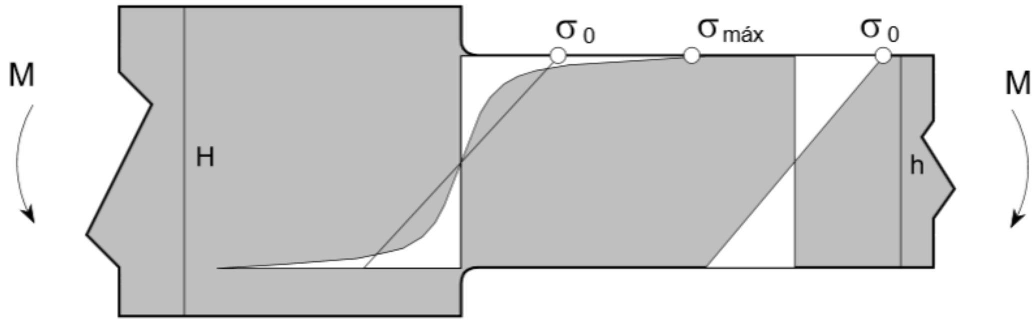
- Distribuição de tensões em uma barra escalonada submetida à flexão. (análise numérica)





Fator Concentração de Tensões

- A tensão nominal é idealizada desconsiderando irregularidades e a presença de concentradores
- A concentração de tensões aumenta para algumas irregularidades não inerentes ao componente
- Os ***fatores de concentração de tensão*** K_t e K_{ts} são utilizados para relacionar as tensões máximas na descontinuidade com a tensão nominal



$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_0} \qquad K_{ts} = \frac{\tau_{max}}{\tau_0}$$

Fator Concentração de Tensões

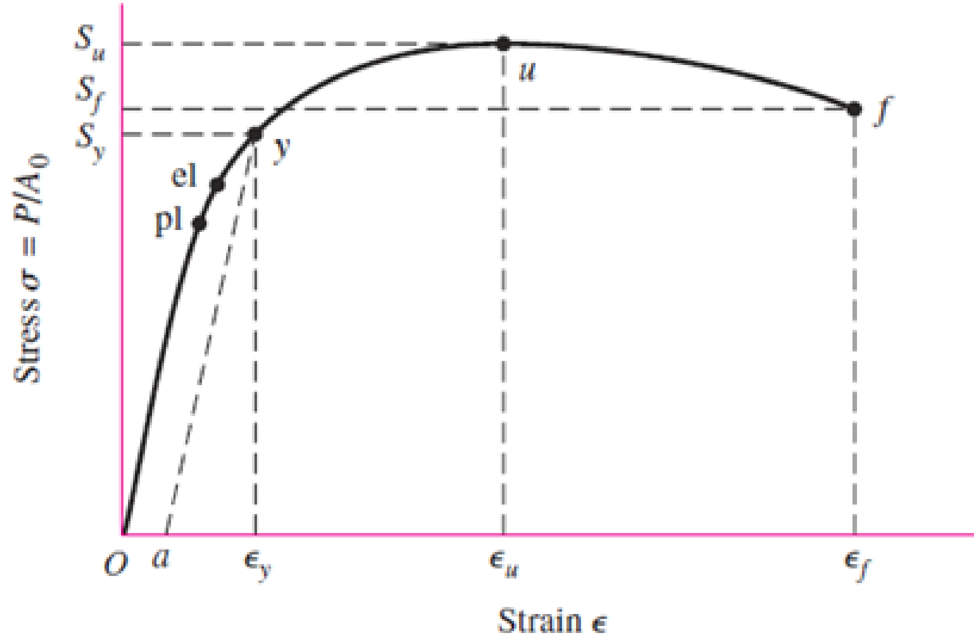
$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_0}$$

- O índice ***t*** em K_t indica que o fator de concentração de tensões depende somente das considerações geométricas

- O fator K_t independe do material, por isso este deve ser interpretado como um fator teórico de concentração de tensões
- A maioria dos fatores de contração de tensões são obtidos experimentalmente

Fator Concentração de Tensões

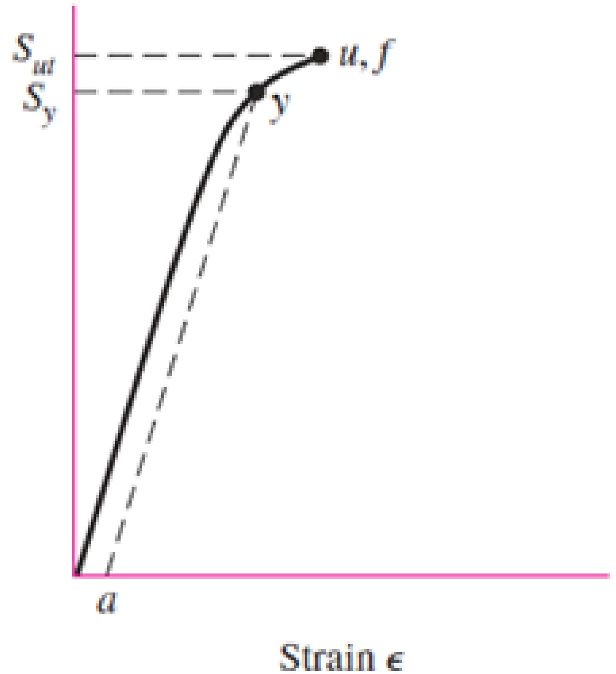
- Para **materiais dúcteis** ($\varepsilon_f \geq 0{,}05$) sujeitos a carregamentos estáticos o fator de concentração de tensões geralmente não é aplicado
- A concentração de tensões levará a plastificação localizada que tendem a aumentar a resistência do material no ponto



(Shigley, E. Mechanical Engineering Design, 8th Edition, MacGrawHill, 2008)

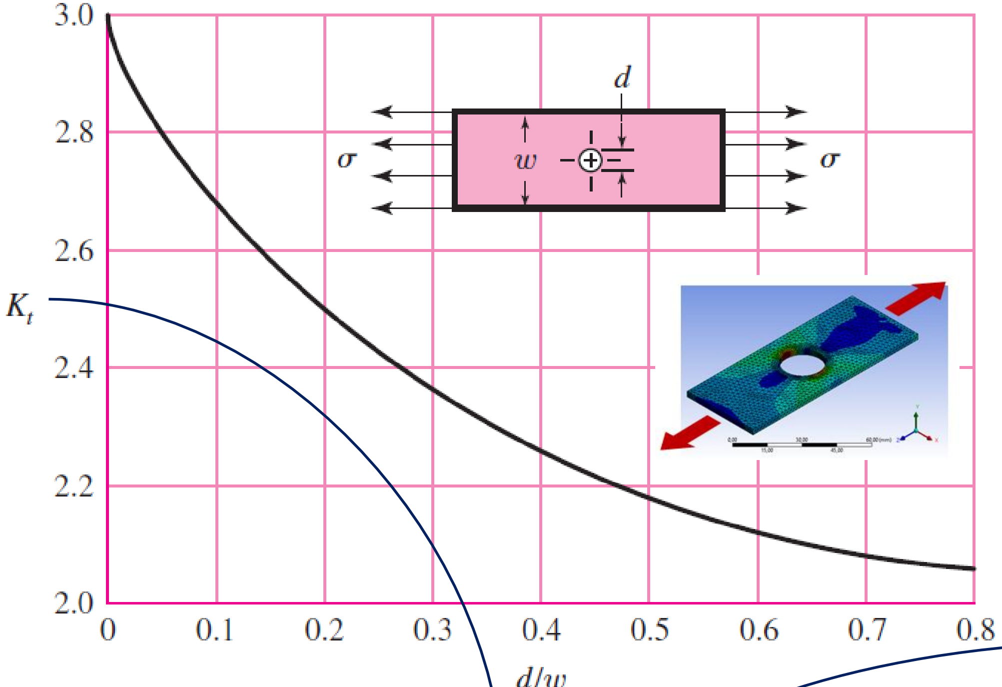
Fator Concentração de Tensões

- Para **materiais frágeis** ($\varepsilon_f < 0{,}05$) também sujeitos a carregamentos estáticos o fator de concentração de tensões é aplicado a tensão nominal, e depois comparado com a tensão máxima equivalente



(Shigley, E. Mechanical Engineering Design, 8th Edition, MacGrawHill, 2008)

Fator Concentração de Tensões



- Considerando uma placa de espessura ***t***, com furo passante central e sujeita a tensões trativa /compressiva.
- A tensão é dada por F=σwt.
- A tensão nominal é dada por:

$$\sigma_0 = \frac{F}{(w-d)t} = \frac{w}{w-d}\sigma$$

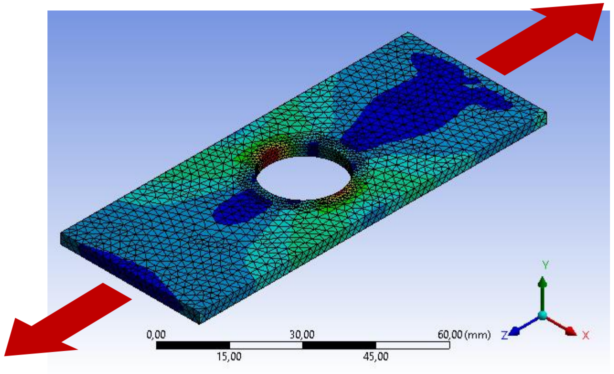
$$\sigma_{max} = K_t * \sigma_0$$

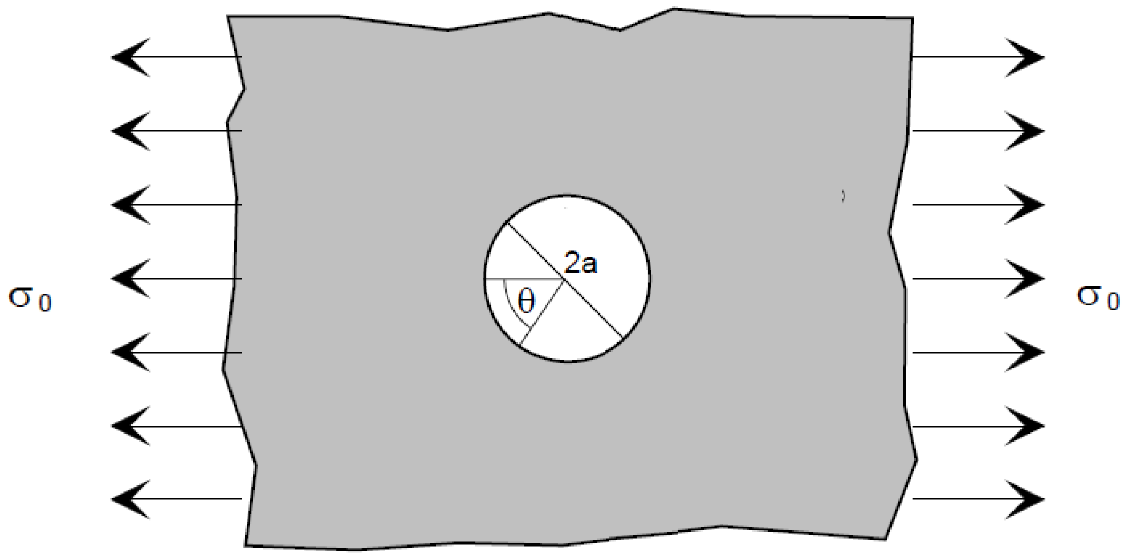
$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_0}$$

(Shigley, E. Mechanical Engineering Design, 8th Edition, MacGrawHill, 2008)

Concentração de tensões

- **Exemplo 1:** Vamos considerar a distribuição de tensões em uma placa, submetida a uma solicitação de tração, contendo um orifício circular de raio a.





http://grante.ufsc.br/download/Fadiga/FADIGA-Livro-Edison-da-Rosa.pdf

Concentração de tensões

- **Exemplo 1:** A solução deste problema, pela Teoria da Elasticidade, leva às expressões abaixo para o estado de tensões em um ponto de coordenadas (r , θ), sendo $\alpha = \frac{a}{r}$

$$\sigma_{rr} = \sigma_0 \left[(1-\alpha^2) + (1-\alpha^2)\,(1-3\alpha^2)\cos(2\theta) \right]/2$$

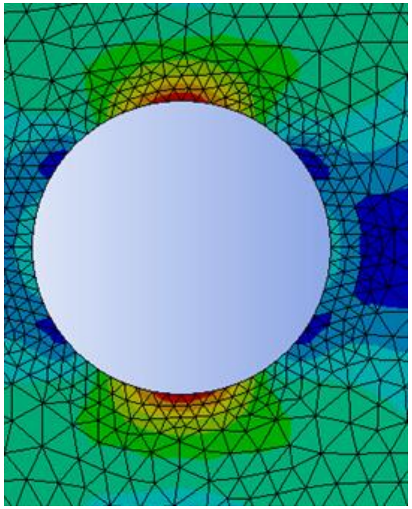
$$\sigma_{\theta\theta} = \sigma_0 \left[(1+\alpha^2) - (1-3\alpha^4)\cos(2\theta) \right]/2$$

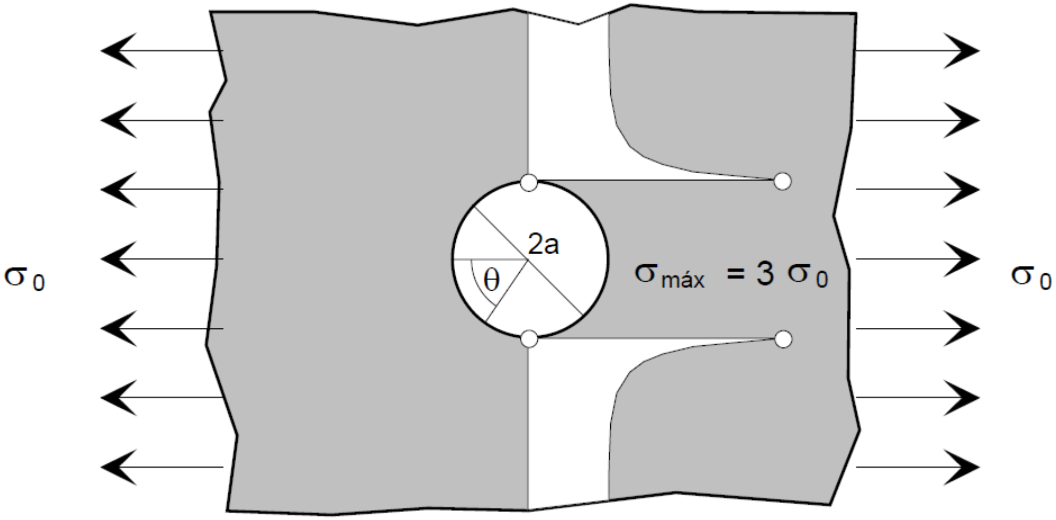
$$\sigma_{r\theta} = -\sigma_0 \left[(1-\alpha^2)\,(1-3\alpha^2)\cos(2\theta) \right]/2$$

http://grante.ufsc.br/download/Fadiga/FADIGA-Livro-Edison-da-Rosa.pdf

Concentração de tensões

- **Exemplo 1:** É importante observar que nos pontos com $\theta = 0$ e $\theta = \pi$ a tensão tangencial atinge o valor de $-\sigma_0$, ou seja, é compressiva.
- Os pontos mais solicitados, que são os prováveis pontos críticos, estão em $\theta = \pi/2$ e em $\theta = 3\pi/2$.

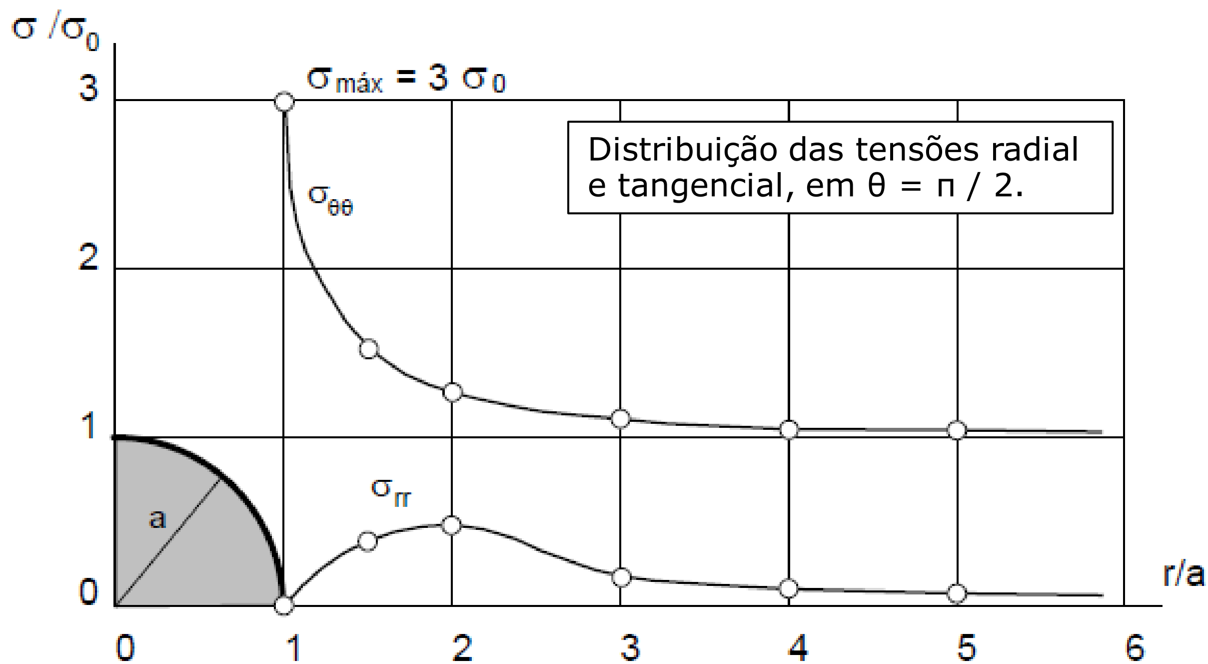




http://grante.ufsc.br/download/Fadiga/FADIGA-Livro-Edison-da-Rosa.pdf

Concentração de tensões

- **Exemplo 1:** A análise da distribuição de tensões esquematizada permite concluir que os pontos críticos estão localizados sobre o perímetro do orifício. Com base nos valores das tensões calculados, concluímos que $K_t = 3$, para o ponto mais solicitado



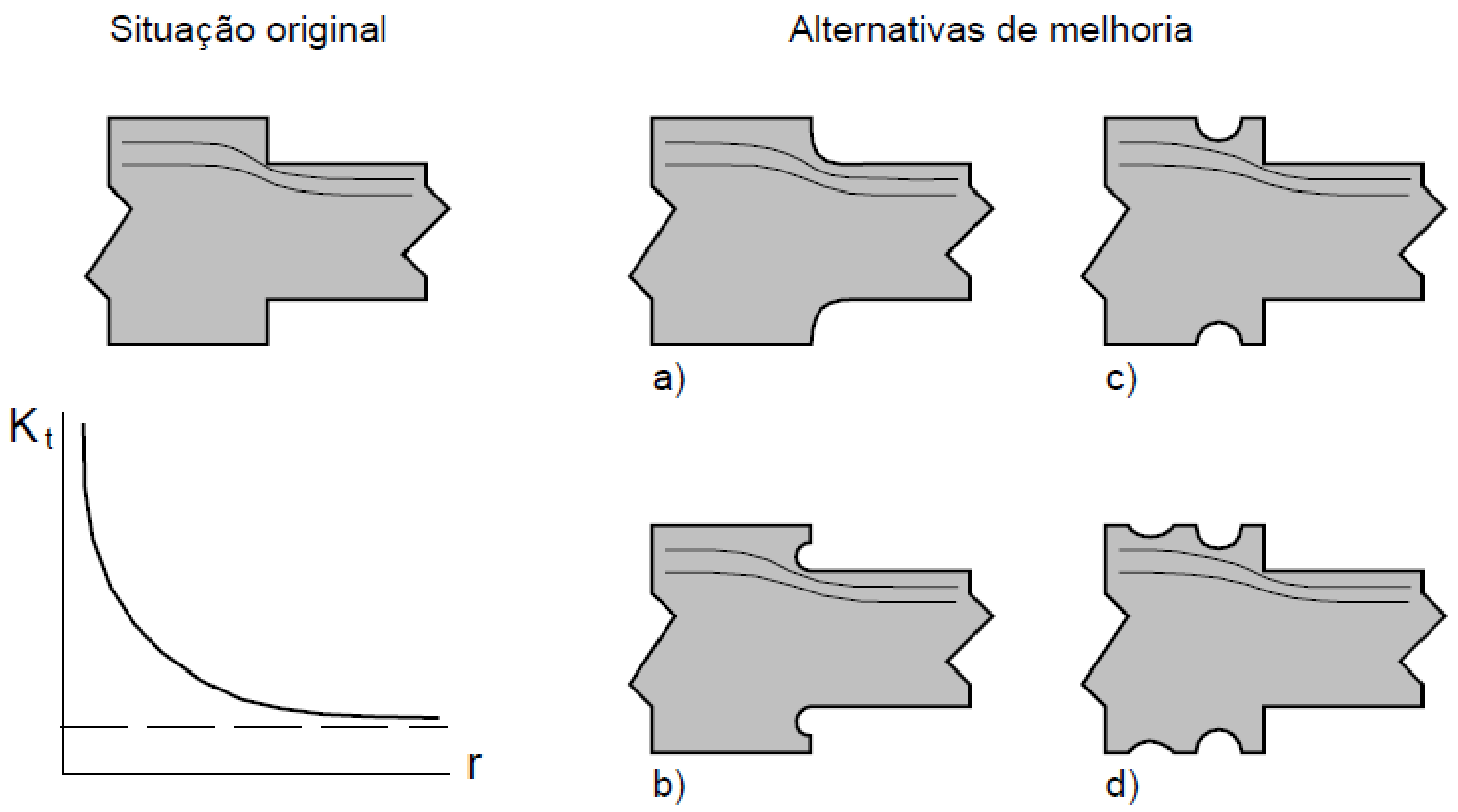
http://grante.ufsc.br/download/Fadiga/FADIGA-Livro-Edison-da-Rosa.pdf

Formas de reduzir a concentração de tensão

- Existem duas maneiras de reduzir o fator de concentração de tensões:
  1) Aumentando o raio de concordância no ponto crítico
  2) Desviando o fluxo de tensões do ponto crítico, fazendo com que a solicitação nominal neste ponto seja muito baixa, levando assim a uma tensão máxima também menor.

Formas de reduzir a concentração de tensão

- Exemplos:



Introdução a fratura mecânica

- Fratura é a separação de um corpo em duas ou mais partes quando submetido à um esforço mecânico.
- ***Leonardo da Vinci***: a resistência de arames de ferro varia inversamente com o seu comprimento, logo as trincas internas controlam a resistência.
- ***Griffith*** (1920): De acordo com Griffith, a fratura ocorre quando a variação da energia de deformação supera a energia necessária para a criação de novas superfícies no material.
- ***Wastergaard*** (1938) chama a atenção de Irwin e colaboradores no sentido de que um único parâmetro serve para caracterizar o campo de tensões na frente de trincas.
- ***Irwin*** (1956) modifica a equação de Griffith.
- Este parâmetro está relacionado com a energia de **Griffith**, logo pode ser considerado força motriz da fratura.

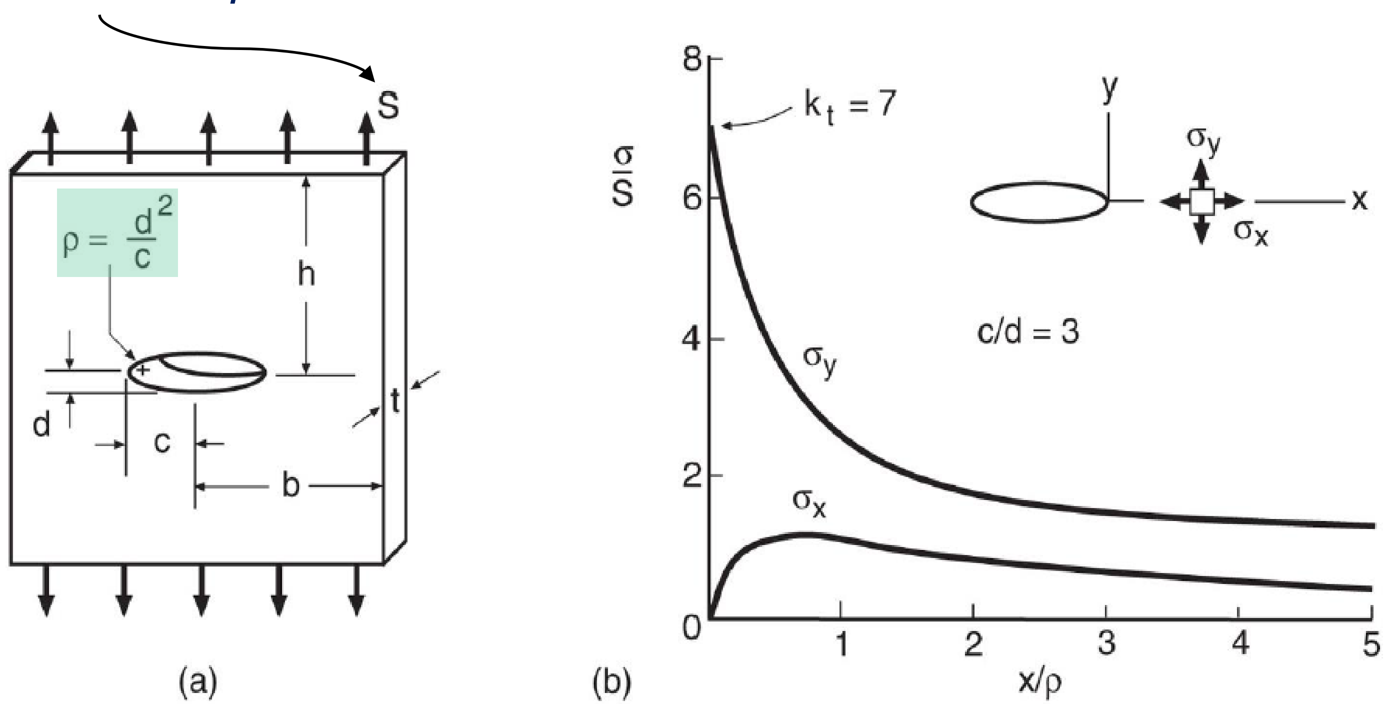
Introdução a fratura mecânica

- Concentração das tensões em um furo elíptico

$$\frac{\sigma_y}{S} = 1 + 2\frac{c}{d} = 1 + 2\sqrt{\frac{c}{\left(\frac{d^2}{c}\right)}}$$

$$\frac{\sigma_y}{S} = 1 + 2\frac{c}{d} = 1 + 2\sqrt{\frac{c}{\rho}}$$

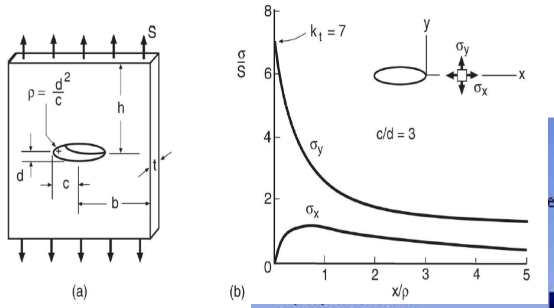
S = tensão bruta aplicada

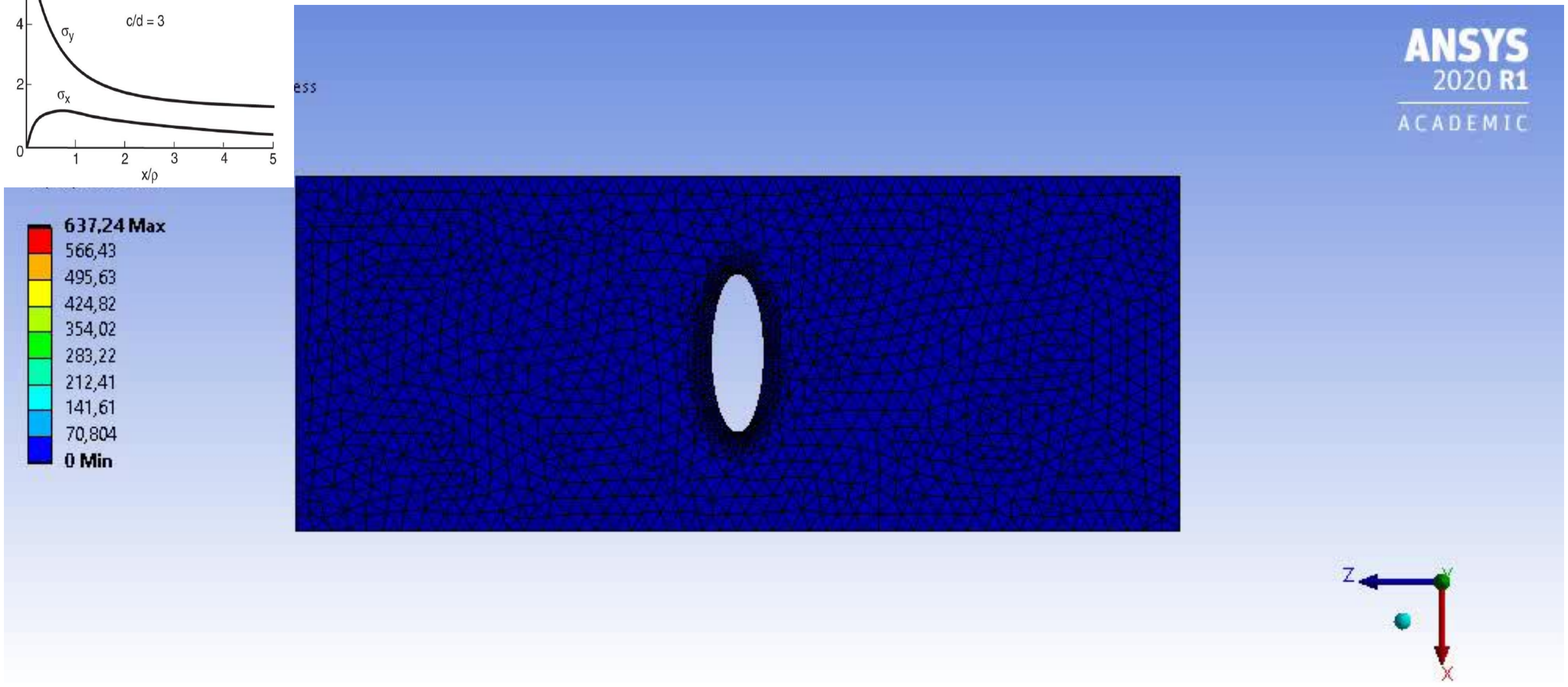


(a) (b)

Introdução a fratura mecânica

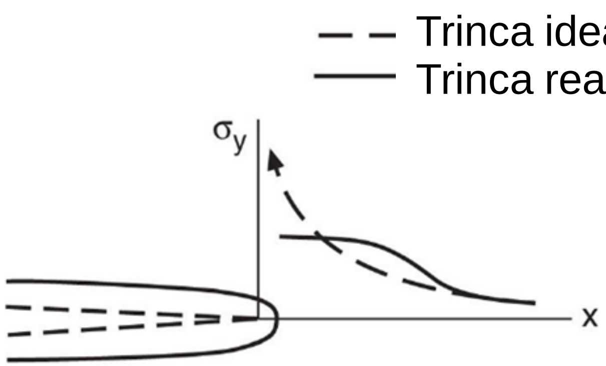
- Concentração das tensões em um furo elíptico

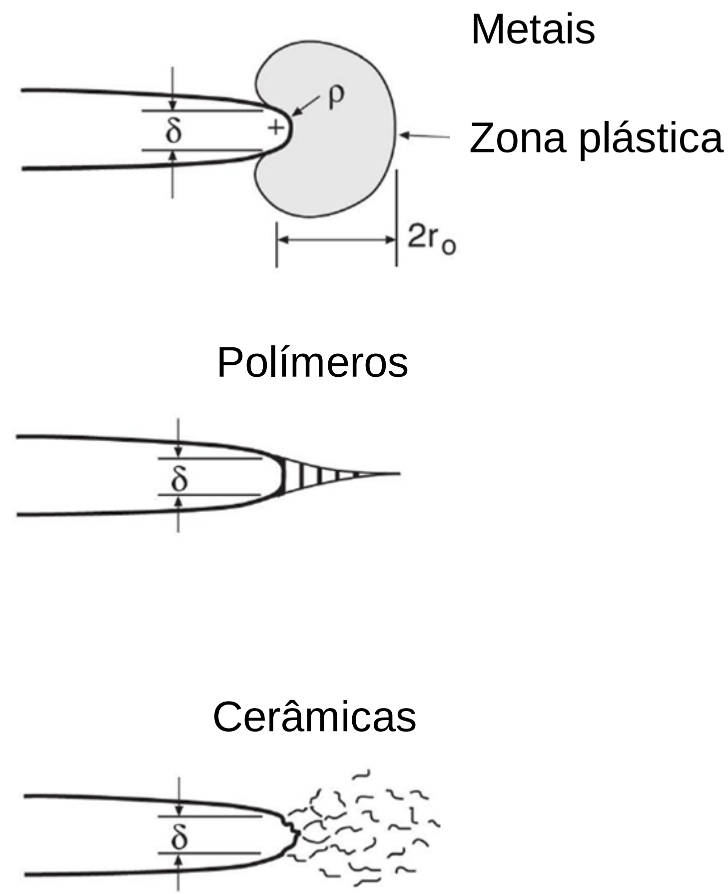




Introdução a fratura mecânica

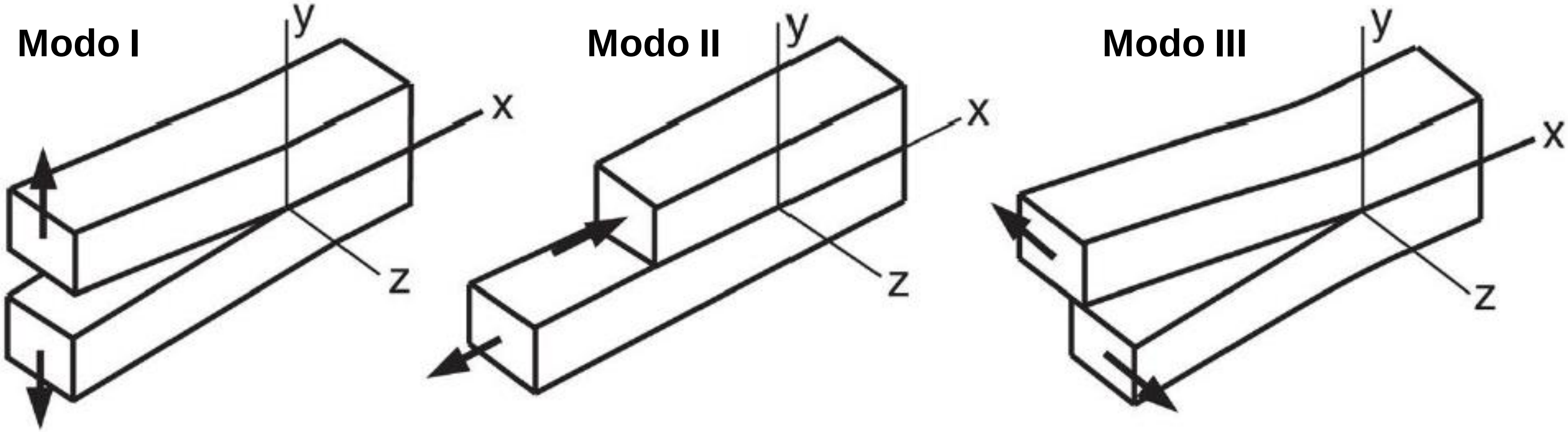
- Escoamento localizado em materiais estruturais





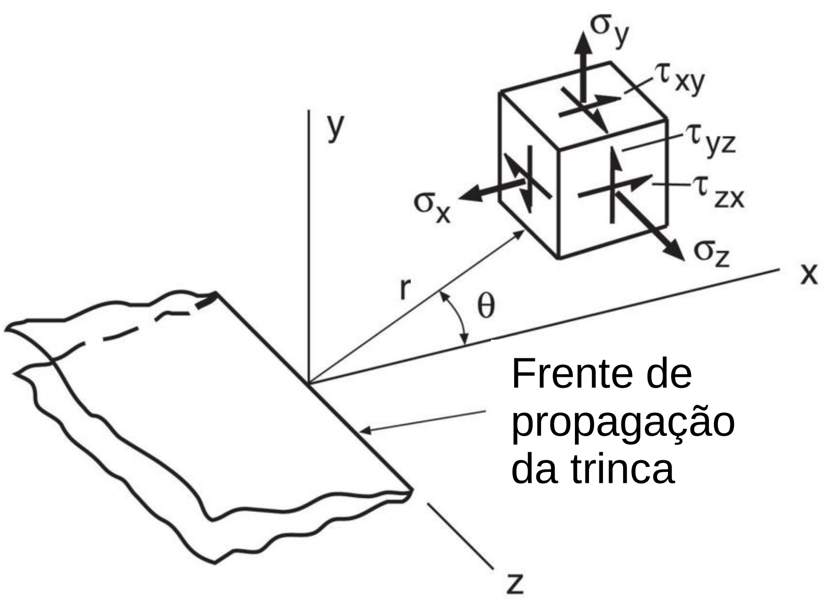
Introdução a fratura mecânica

- Modos básicos de deslocamento das faces da trinca



Introdução a fratura mecânica

- Modos de trincamento e o fator de intensidade de tensão



$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}}\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\left[1-\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right]+\ldots$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}}\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\left[1+\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right]+\ldots$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}}\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\cos\left(\frac{3\theta}{2}\right)+\ldots$$

$$\sigma_z = 0 \qquad (\textit{tensão plana})$$

$$\sigma_z = \nu\left(\sigma_x+\sigma_y\right) \qquad (\textit{deformação plana})$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$$

1

Introdução a fratura mecânica

- *Qualquer que seja a geometria e o tipo de carga, todos os corpos trincados no regime elástico têm a mesma distribuição de tensões, deformações e deslocamentos na região dominada pela singularidade*.

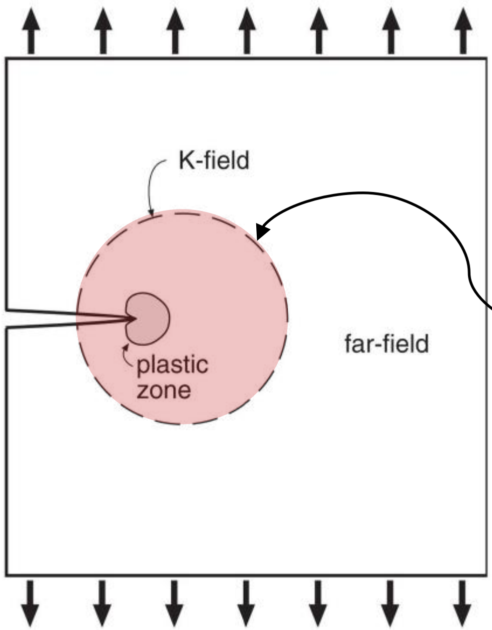
- Apenas a ***magnitude*** destes campos, representada pelo parâmetro K, varia com a geometria e tipo de carga.

$$K = S_g\sqrt{\pi\ a\ F}$$

S_g => tensão nominal bruta

Critério de falha baseado no campo de tensões

- Um componente trincado falha por fratura frágil quando o estado de tensões no entorno da ponta da trinca atinge um valor crítico.
- A zona de processamento deverá estar completamente contida dentro da região dominada pela singularidade.



$$K = S_g\sqrt{\pi\, a\, F} = K_c$$

Região dominada pela singularidade

Critério tradicional da mecânica dos materiais versus critério de falha baseado no campo de tensões

tensão aplicado

resistência a tração

Abordagem da resistência dos materiais

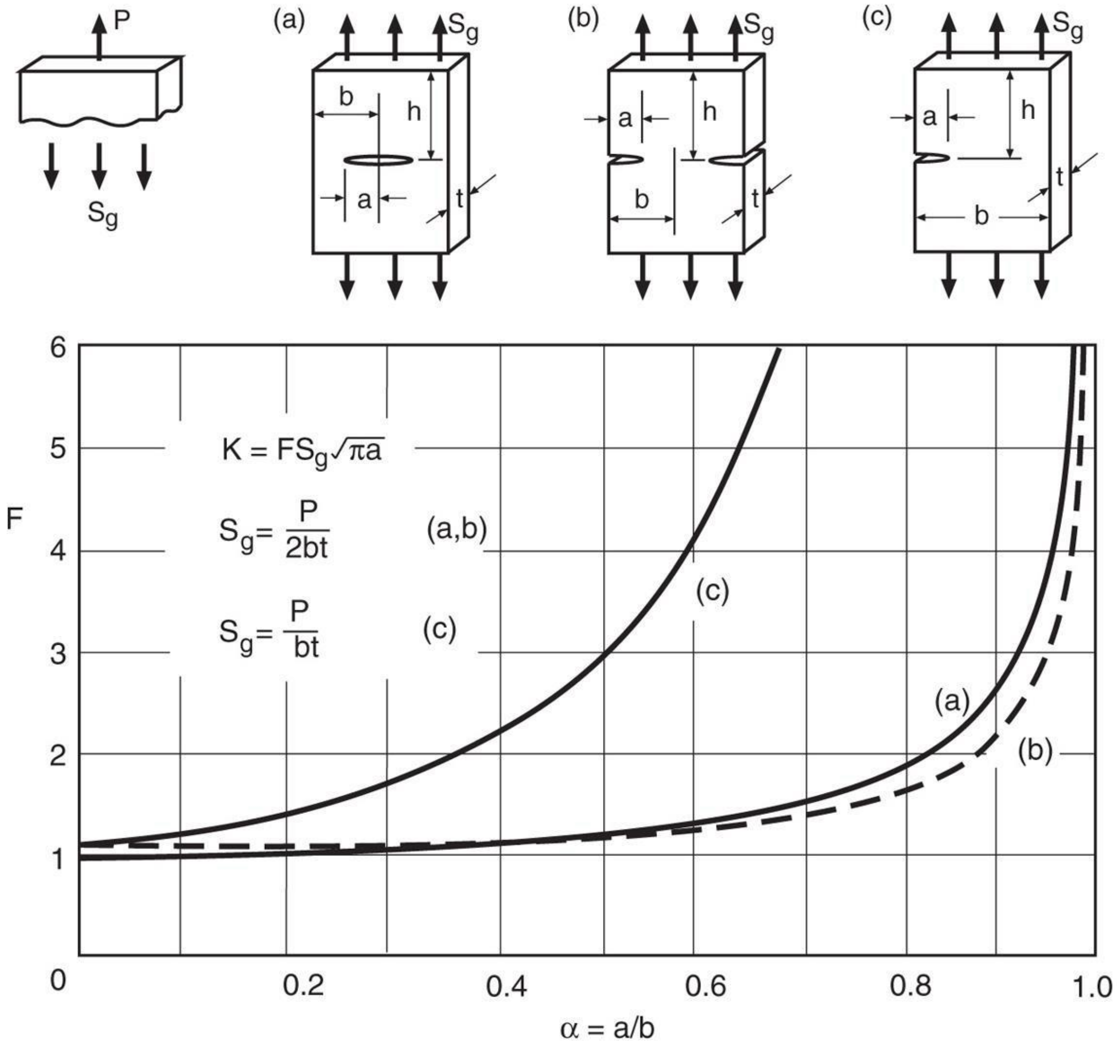
tensão aplicado

Tamanho da falha - ***trinca*** -

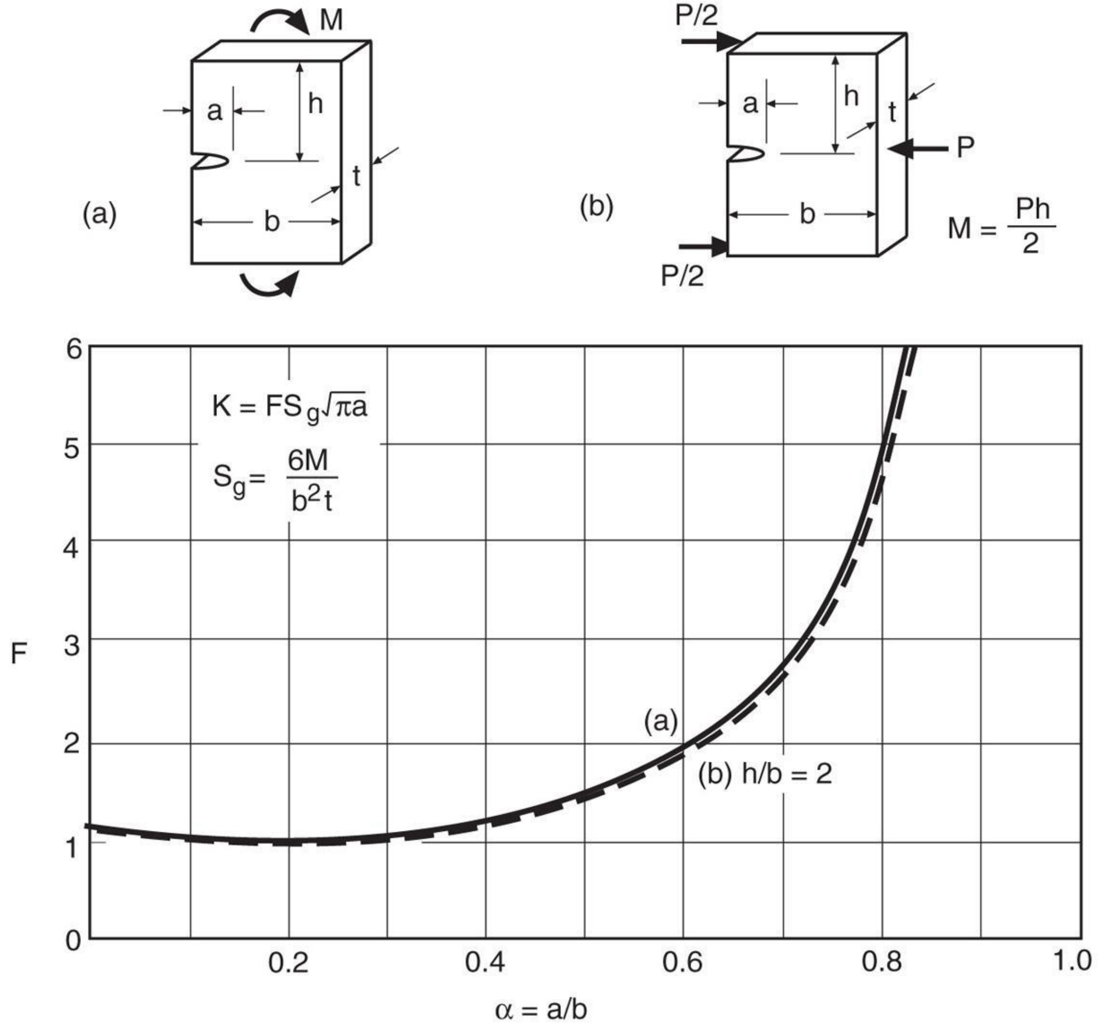
tenacidade a fratura

Abordagem da mecânica da fratura

Alguns fatores de geometria para chapas trincadas em tração



Alguns fatores de geometria para chapas trincadas em flexão



Fator de geometria para eixos redondos com trinca circunferencial

Axial load P: $S_g = \dfrac{P}{\pi b^2}$, $\quad F = 1.12 \quad (10\%,\ a/b \le 0.21)$

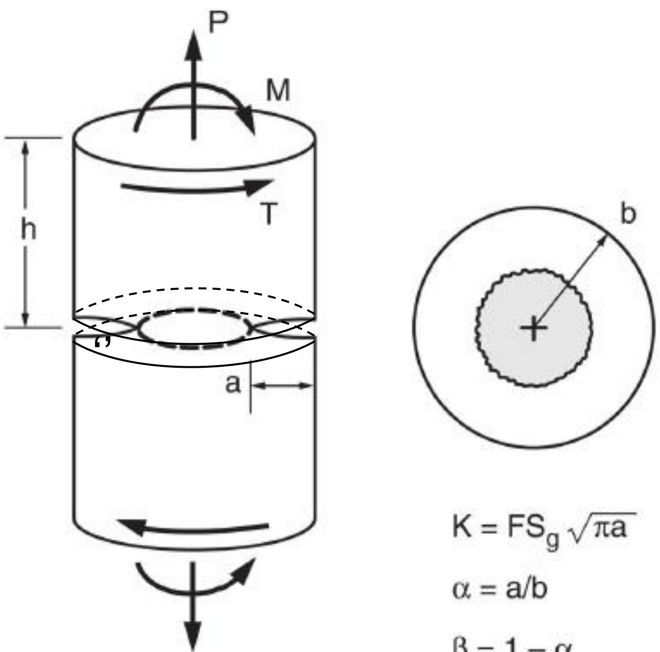
$$F = \frac{1}{2\beta^{1.5}}\left[1 + \frac{1}{2}\beta + \frac{3}{8}\beta^2 - 0.363\beta^3 + 0.731\beta^4\right]$$

Bending moment M: $S_g = \dfrac{4M}{\pi b^3}$, $\quad F = 1.12 \quad (10\%, a/b \le 0.12)$

$$F = \frac{3}{8\beta^{2.5}}\left[1 + \frac{1}{2}\beta + \frac{3}{8}\beta^2 + \frac{5}{16}\beta^3 + \frac{35}{128}\beta^4 + 0.537\beta^5\right]$$

Torsion T, $K = K_{III}$: $S_g = \dfrac{2T}{\pi b^3}$, $\quad F = 1.00 \quad (10\%, a/b \le 0.09)$

$$F = \frac{3}{8\beta^{2.5}}\left[1 + \frac{1}{2}\beta + \frac{3}{8}\beta^2 + \frac{5}{16}\beta^3 + \frac{35}{128}\beta^4 + 0.208\beta^5\right]$$

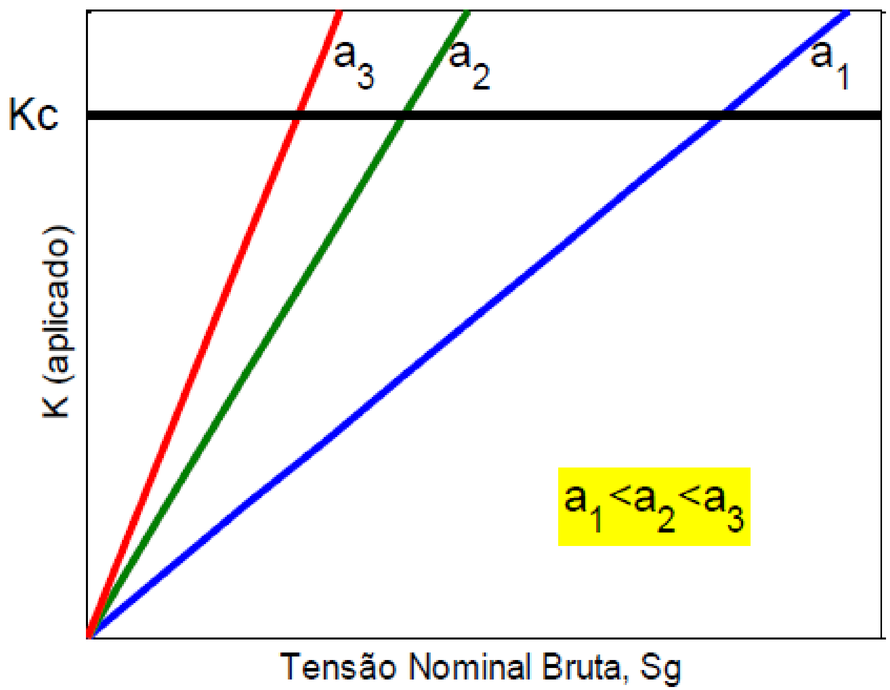


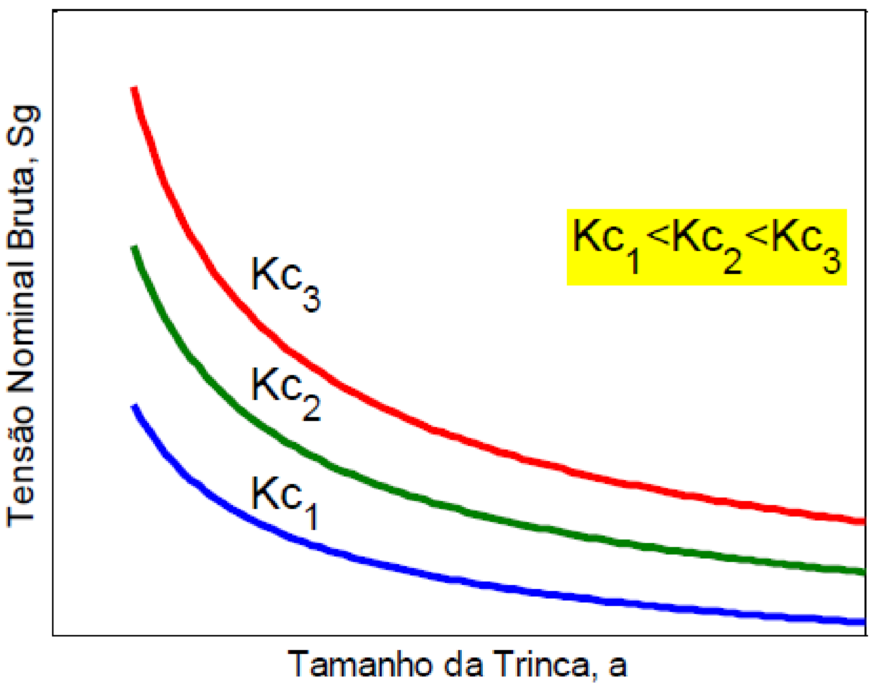
$K = FS_g\sqrt{\pi a}$

$\alpha = a/b$

$\beta = 1 - \alpha$

Critério de falha baseado no campo de tensões





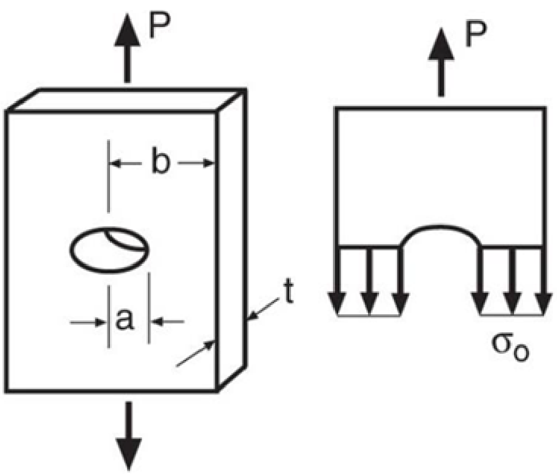
$$K = S_g \sqrt{\pi a}\, F = K_C$$

Objetivo da mecânica da fratura no limite elástico

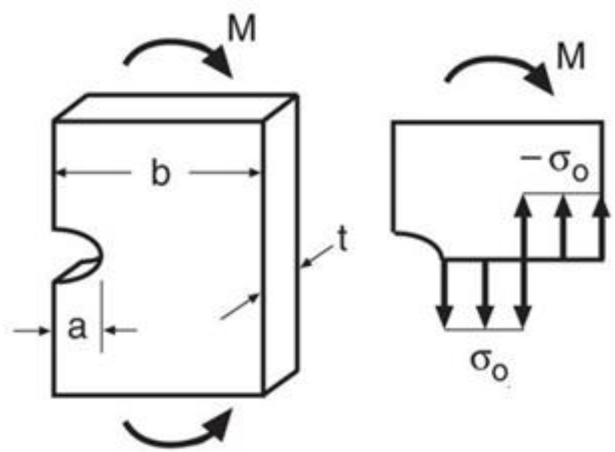
- Determinar a maior carga que uma estrutura trincada pode suportar em serviço (**Pc**)
- Determinar a maior trinca tolerada por uma estrutura em serviço (**ac**)
- Calcular a taxa de propagação de trincas e a vida residual das estruturas trincadas sob carregamentos reais de serviço

Cargas de Colapso Plástico

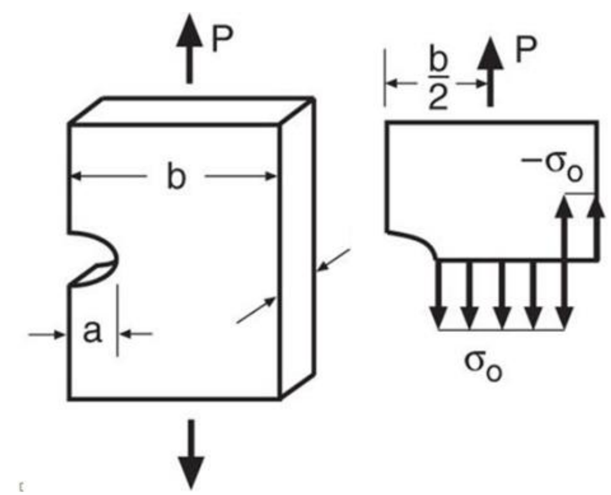
$$S_g = \frac{P}{2bt} = \sigma_0(1 - \frac{a}{b})$$



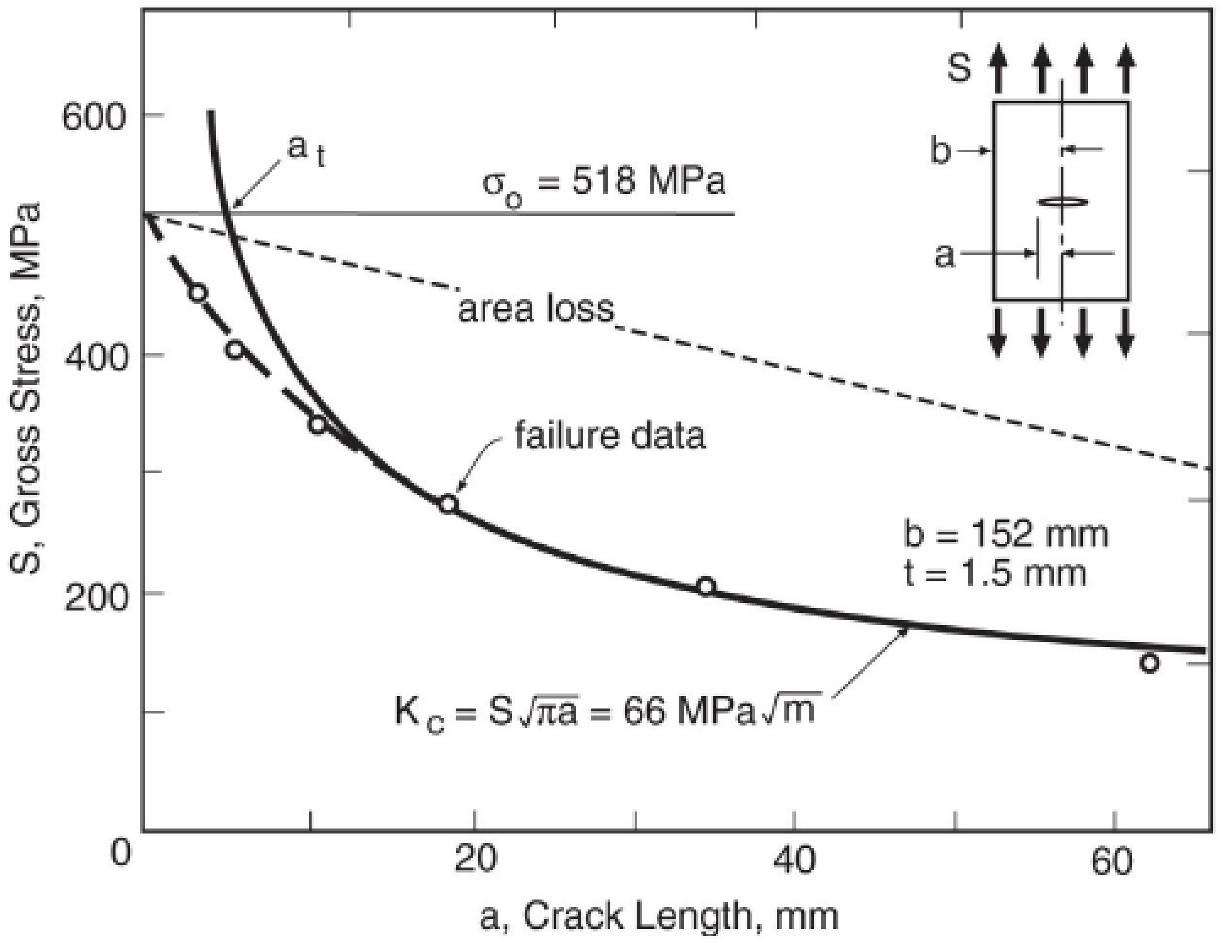
$$S_g = \frac{4M}{b^2 t} = \sigma_0\left(1 - \frac{a}{b}\right)^2$$



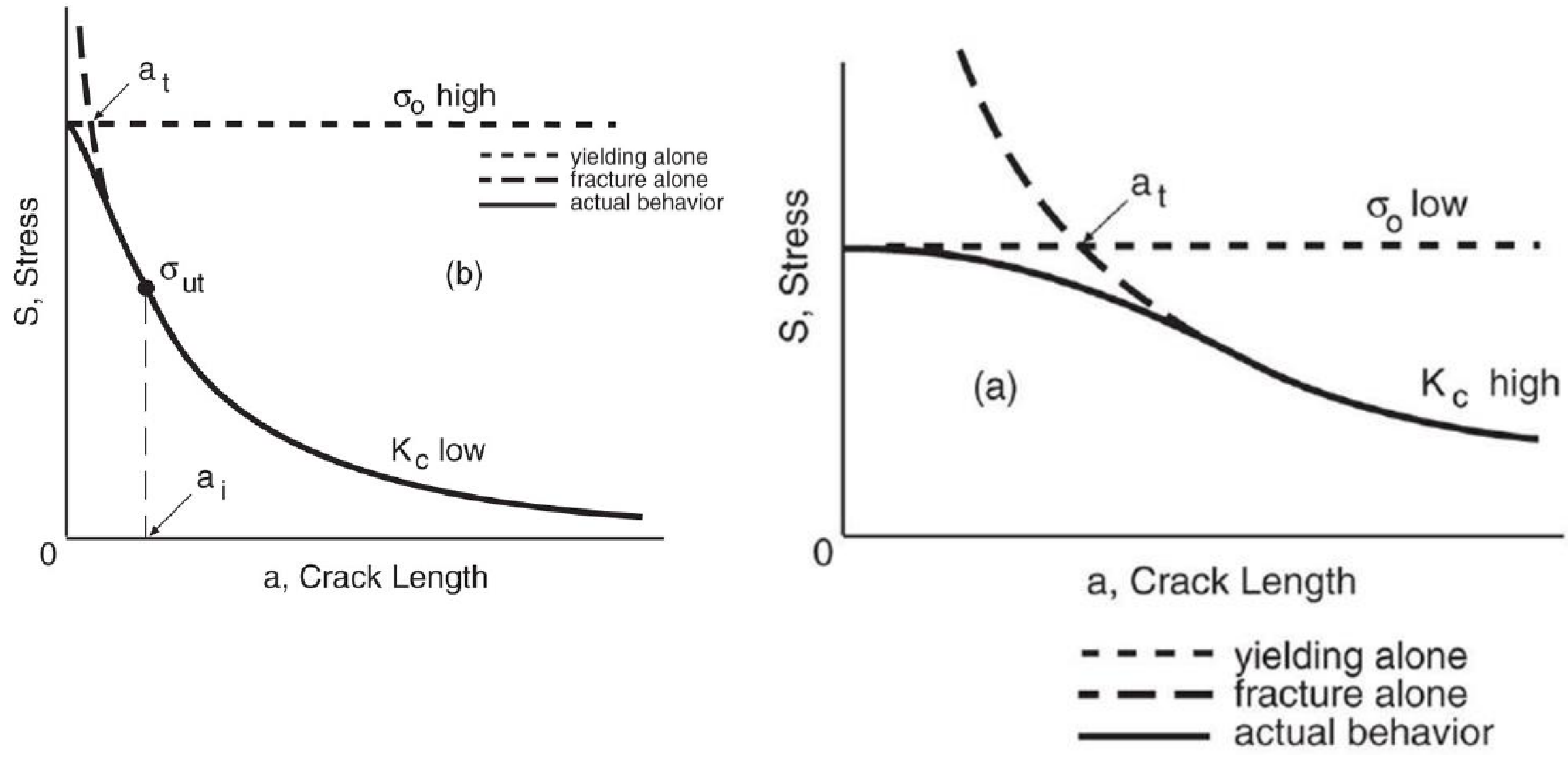
$$P_0 = \frac{b\, t\, \sigma_o}{(-a + \sqrt{2a^2 - 2a + 1}}$$



Efeitos das trincas na resistência residual



Efeitos das trincas na resistência residual



Tenacidade à fratura

- Para chapas finas, $\mathbf{K_C}$ varia com a espessura. No entanto se o parede for espessa, $\mathbf{K_C}$ se torna independente da espessura.
- Para estas condições, uma nova propriedade é utilizada, $\mathbf{K_{IC}}$
- $\mathbf{K_{IC}}$ é o fator de intensidade de tensão crítica em deformação plana (corpos espessos) no modo de carregamento I, e neste caso, é independente da espessura do corpo de prova.

Exemplos de propriedades a fratura

Material	σ_u [MPa]	σ_o [MPa]	K_{IC} [MPa·√m]
Aço 4340	1820	1470	46
Aço Maraging 300	1850	1730	90
Alumínio 7075-T6	560	500	32

K_{IC} = *tenacidade à fratura*

K_{IC} é uma propriedade que representa a medida da resistência de uma material a fratura frágil quando uma trinca está presente.

Fim da Aula A11