



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Elementos de Máquinas para Automação

PMR 3307 – A06

Introdução a falha por fadiga mecânica

Parte - 2

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

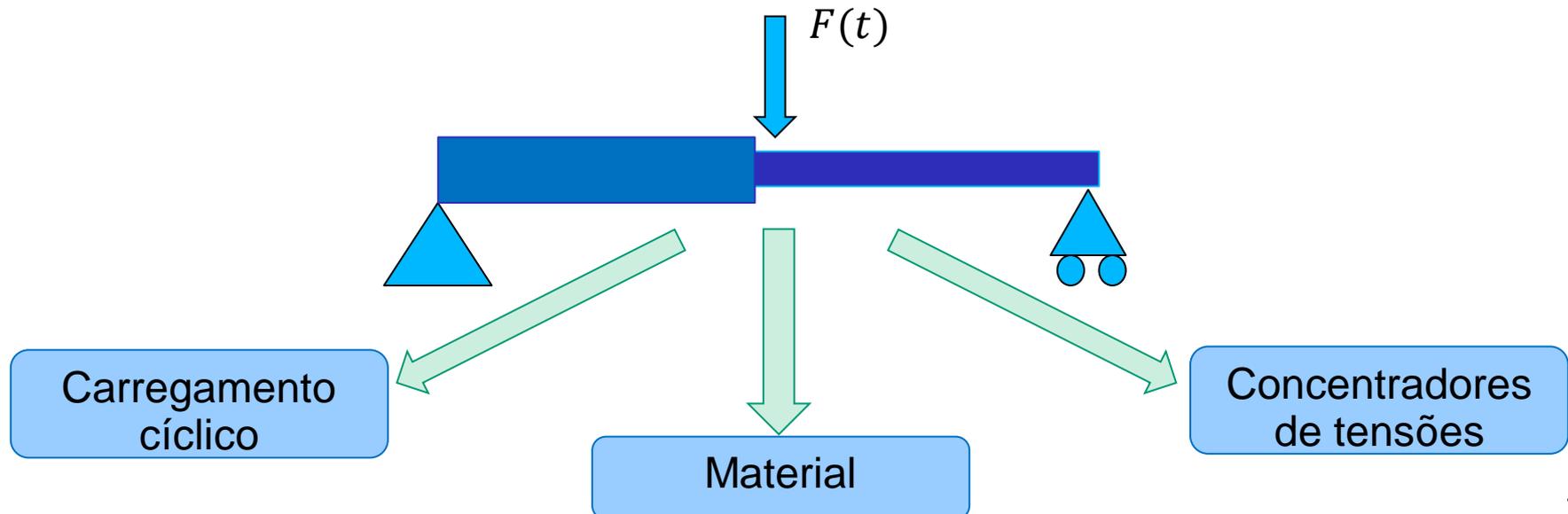
- ▶ Revisão Aula 06
- ▶ Introdução a fadiga mecânica dos materiais
- ▶ Curva de Wohler



Concentração de tensões

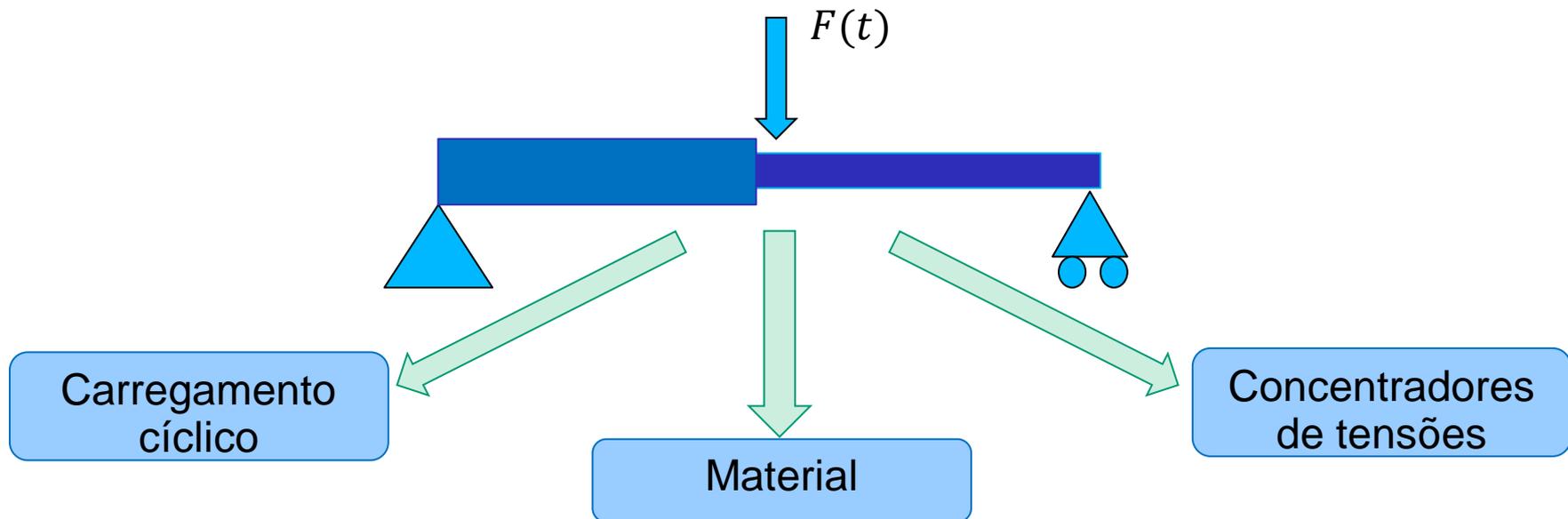
- ▶ Em condições de carregamento estático o fator de concentração de tensões é um algo altamente localizado.
- ▶ O problema se agrava quando os componentes apresentam movimento (Ex. exemplo rotação) ou carregamento cíclico,

Falha por fadiga mecânica



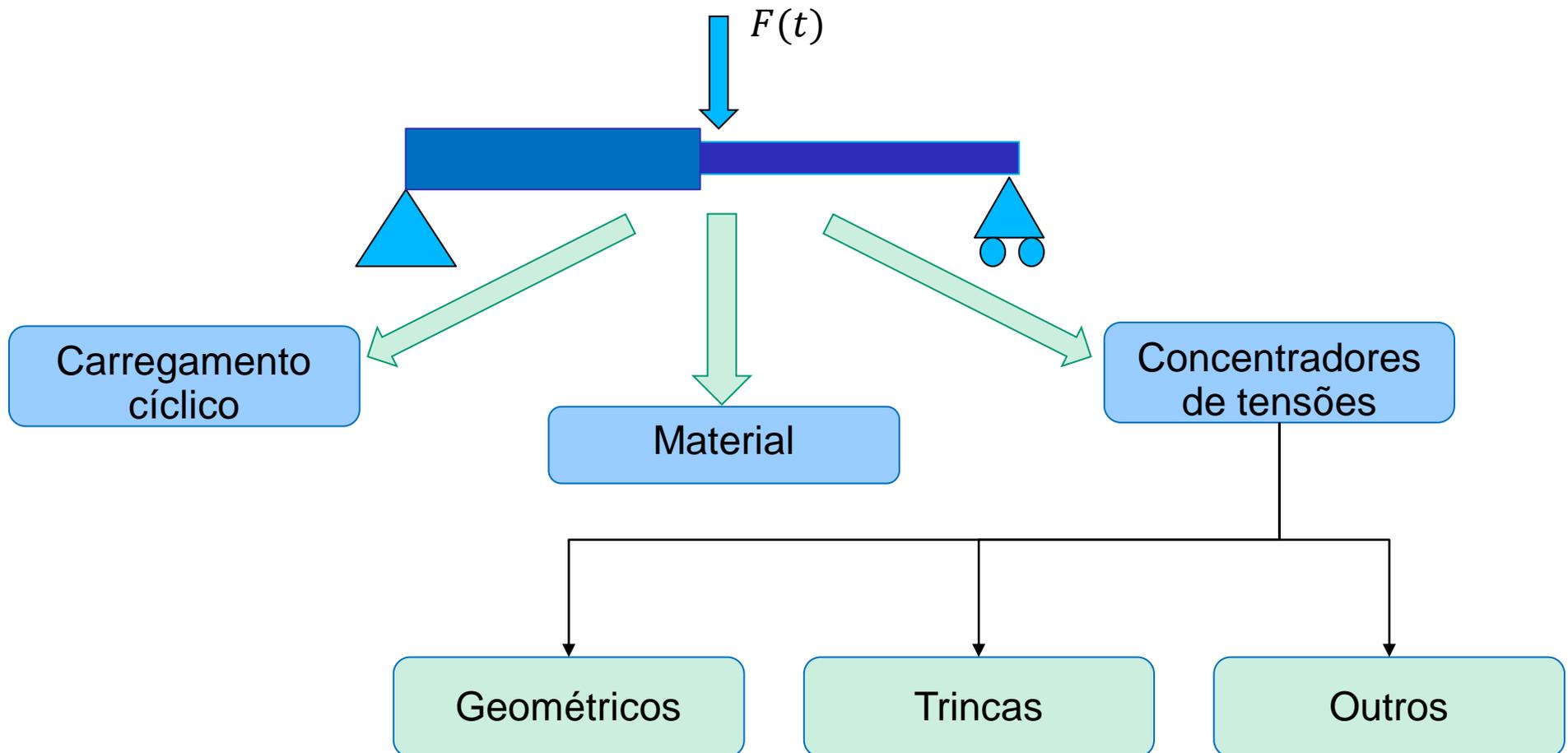


Falha por fadiga mecânica



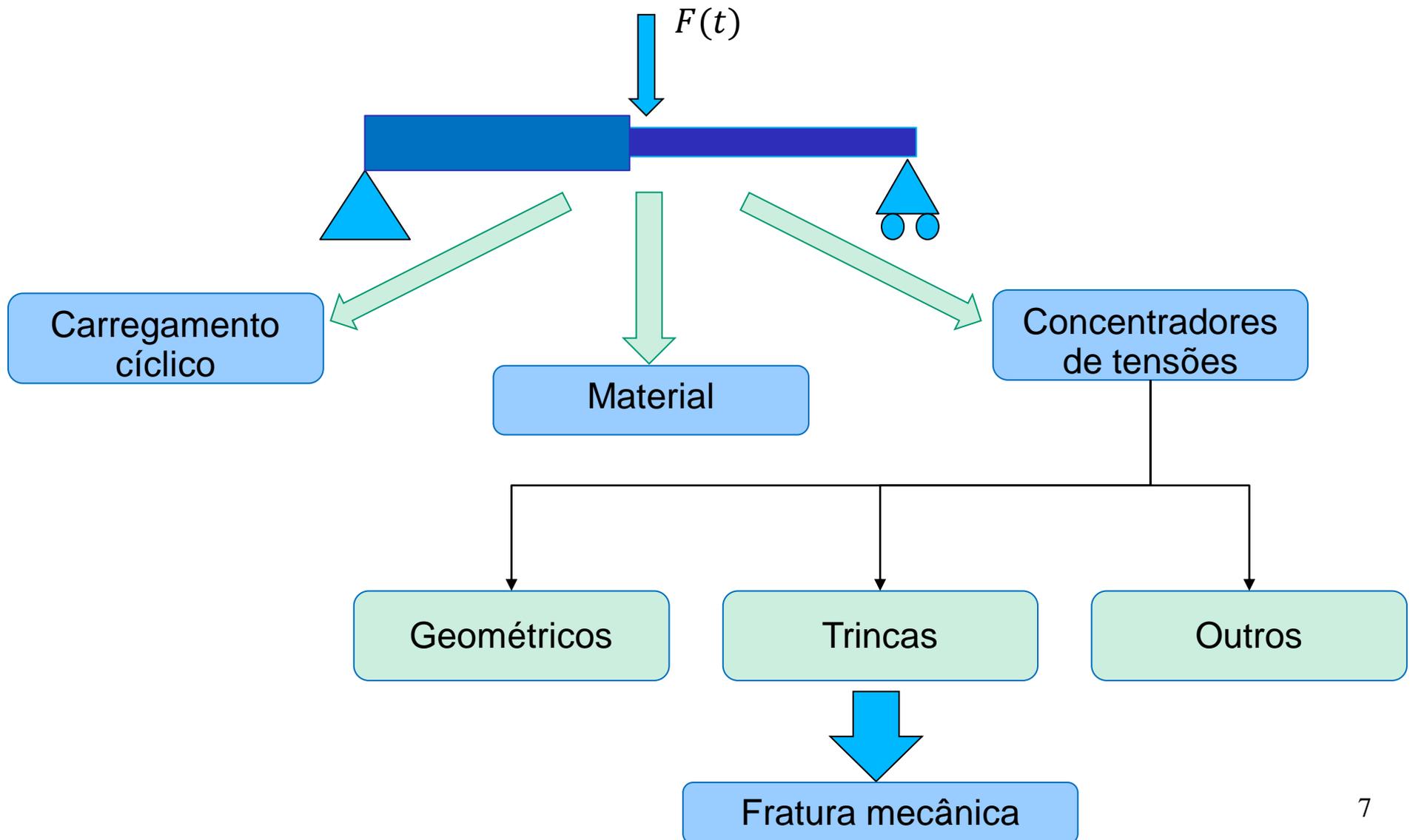


Falha por fadiga mecânica



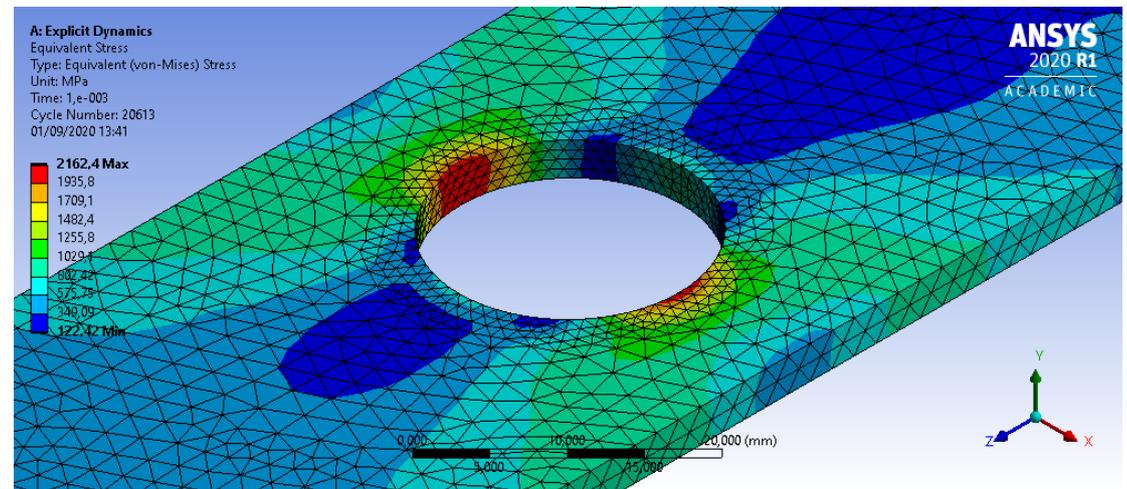
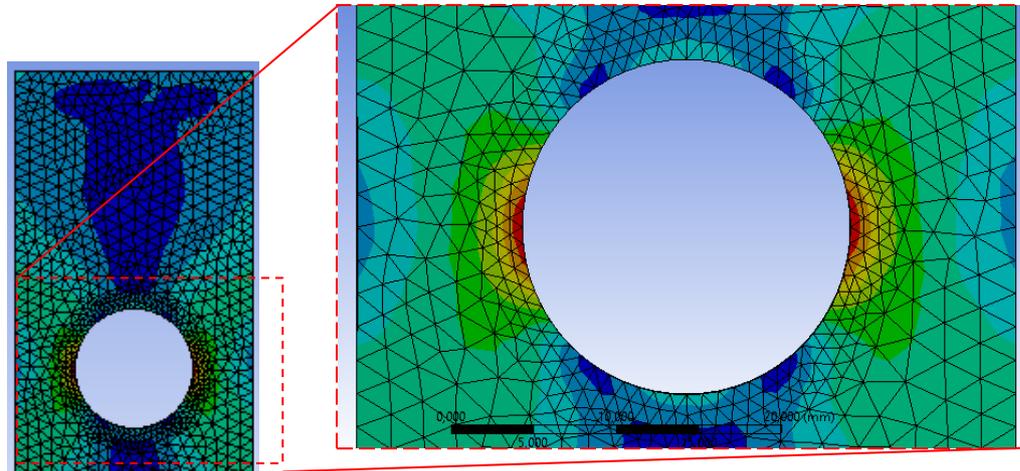
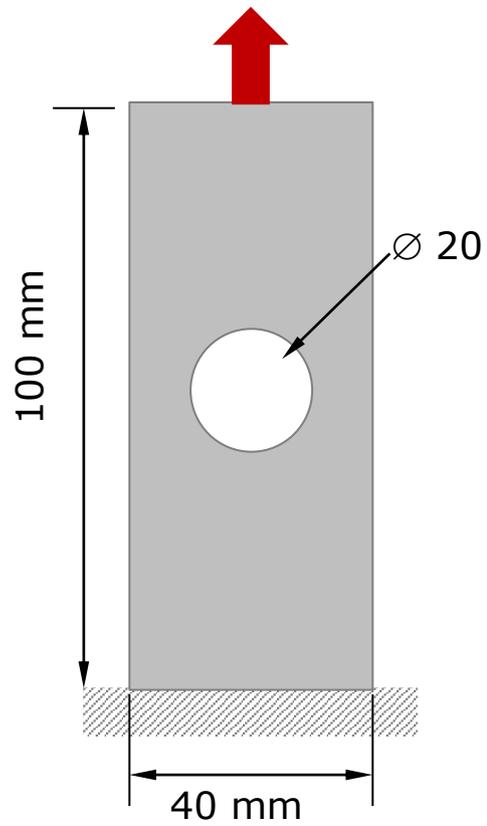


Falha por fadiga mecânica



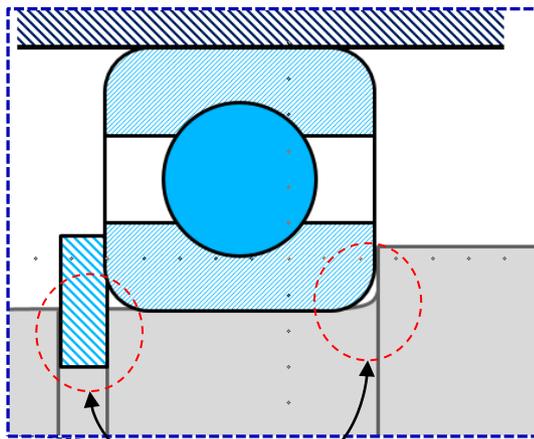
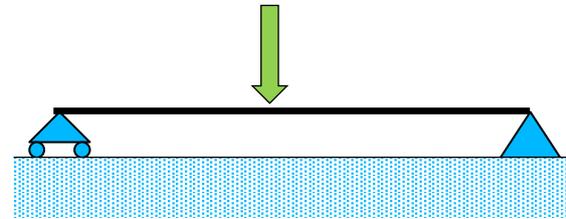


Concentradores de tensões



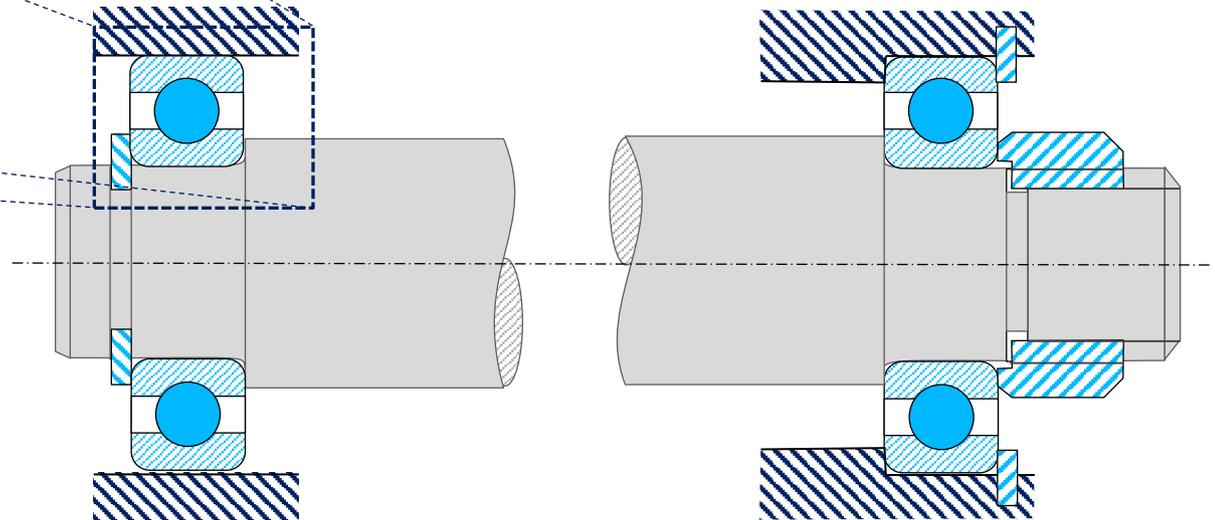


Concentração de tensões



Concentradores
de tensões

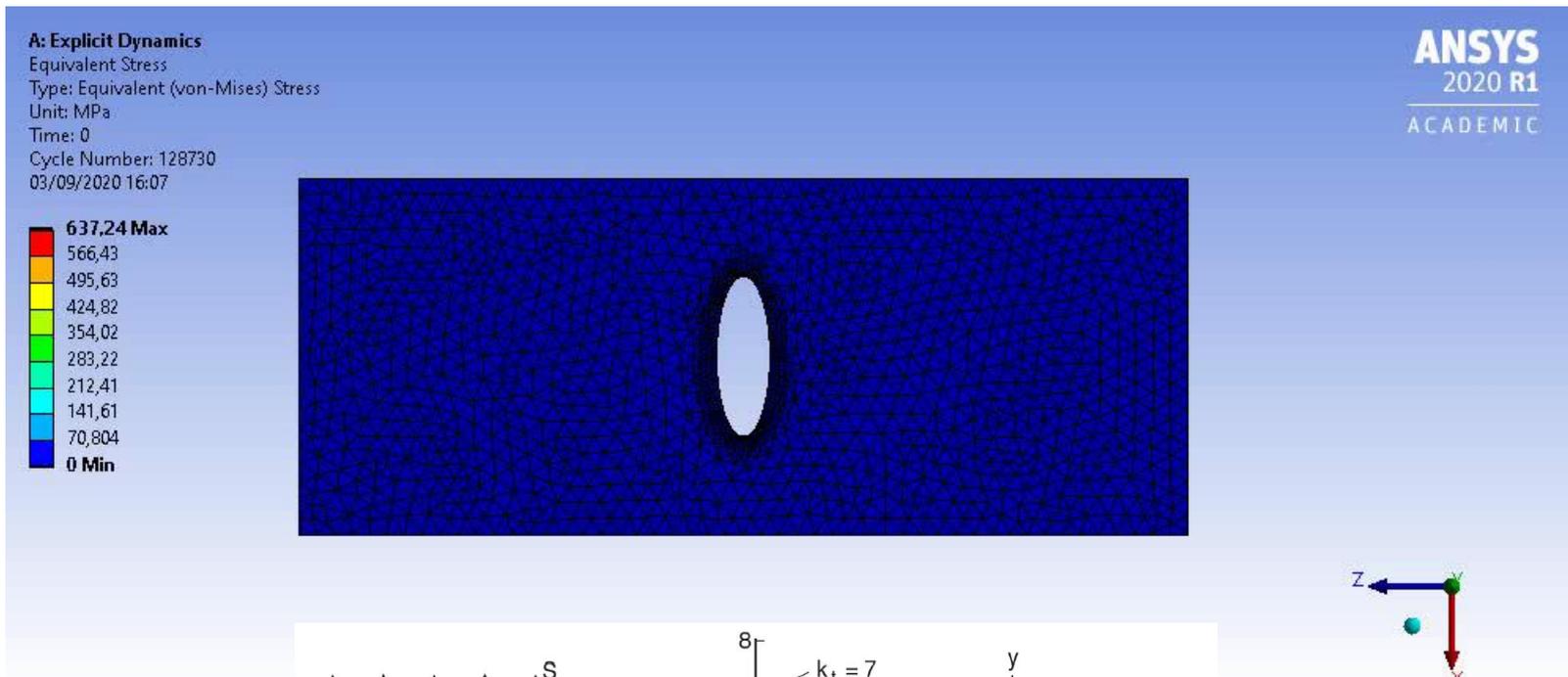
$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_0}$$



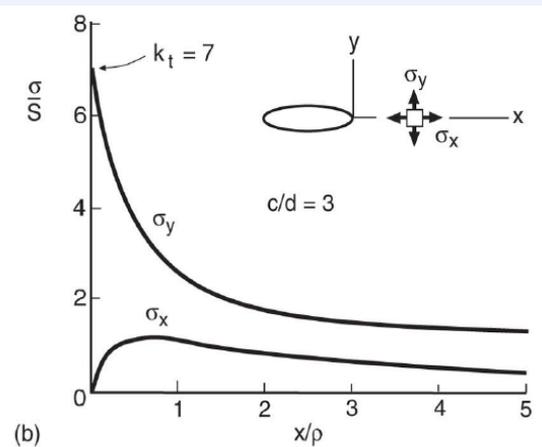
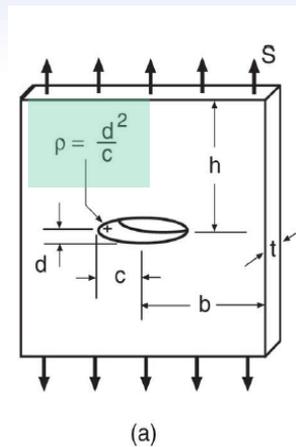


Introdução a fratura mecânica

► Concentração das tensões em um furo elíptico



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

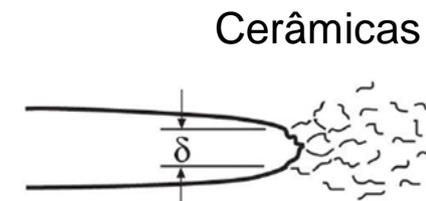
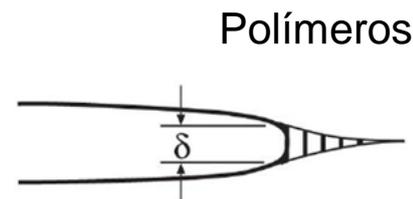
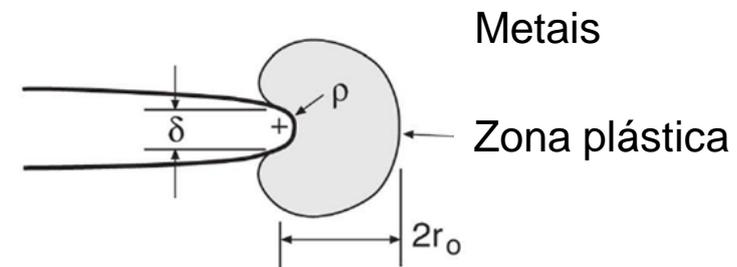
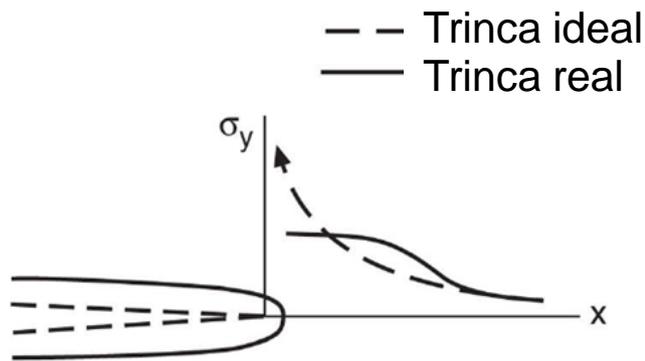


$$\frac{\sigma_y}{S} = 1 + 2 \frac{c}{d} = 1 + 2 \sqrt{\frac{c}{\rho}}$$



Introdução a fratura mecânica

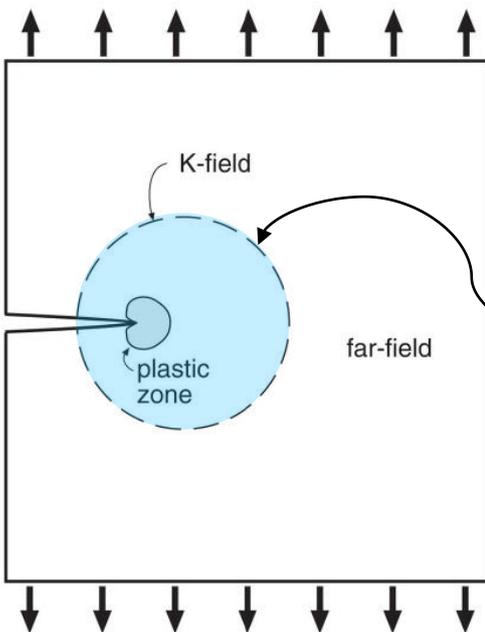
- ▶ Escoamento localizado em materiais estruturais





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.

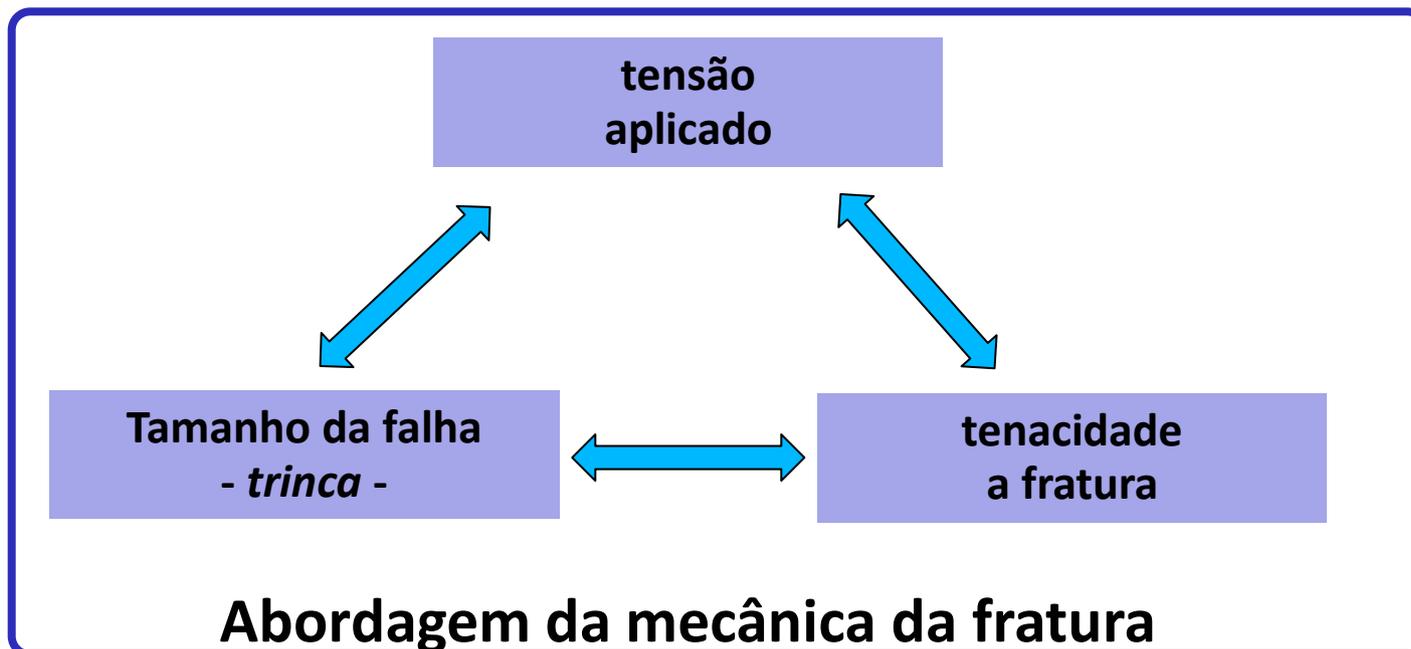
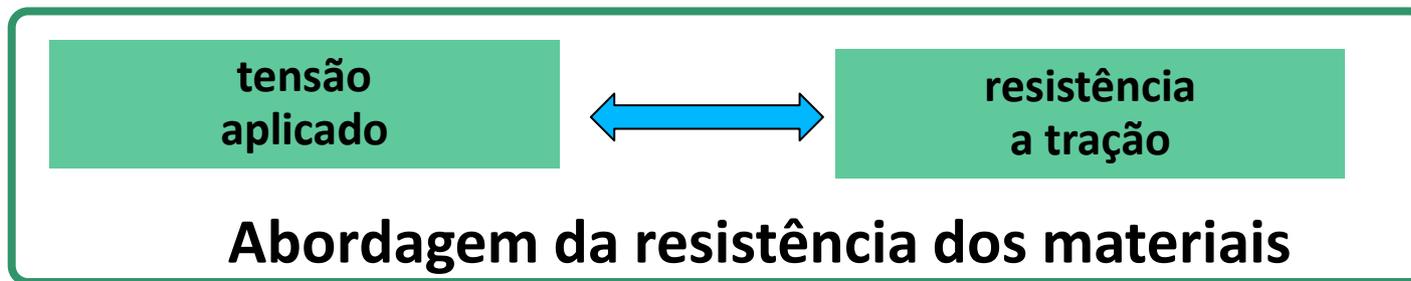


$$K = S_g \sqrt{\pi a F} = K_c$$

Região dominada pela singularidade



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

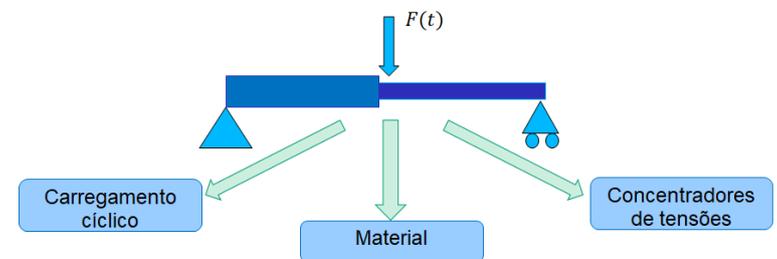




Introdução a Fadiga

- ▶ Início do século XIX já se conhecia fadiga , mas até hoje o conhecimento não é completo.
- ▶ Wohler em 1862, *On the mechanical tests on iron and steel*:
“As tensões com que rompiam em serviço alguns eixos de vagões ferroviários estava bem abaixo da tensão que o eixo suportava estaticamente”
- ▶ Bach, 1908 , separou as solicitações em:

Cargas {
- estáticas
- alternada simétrica
- flutuante



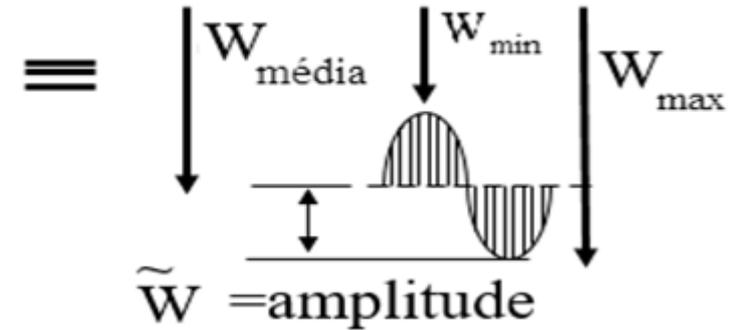
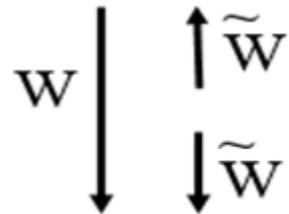
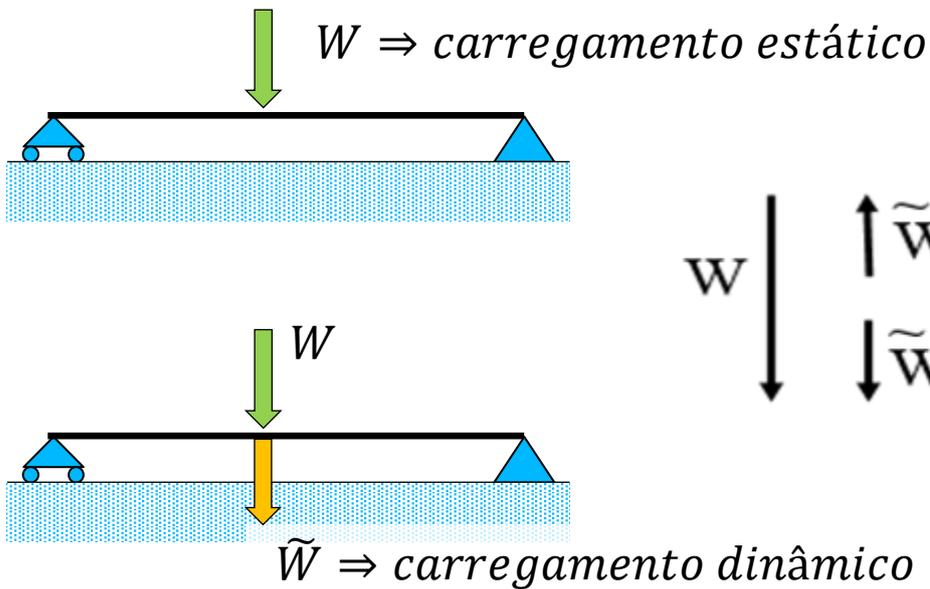


Introdução

Carga {
- estáticas
- alternada simétrica
- flutuante



diferentes coeficientes de segurança





Fadiga

Definição: Processo que causa **falha prematura ou dano permanente** a um componente sujeito a carregamento repetitivos / cíclicos.



Carregamento e descarregamento

Variações de temperatura

Causas



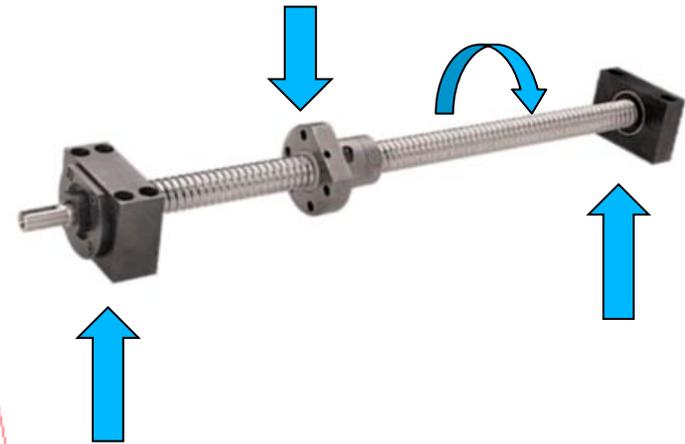
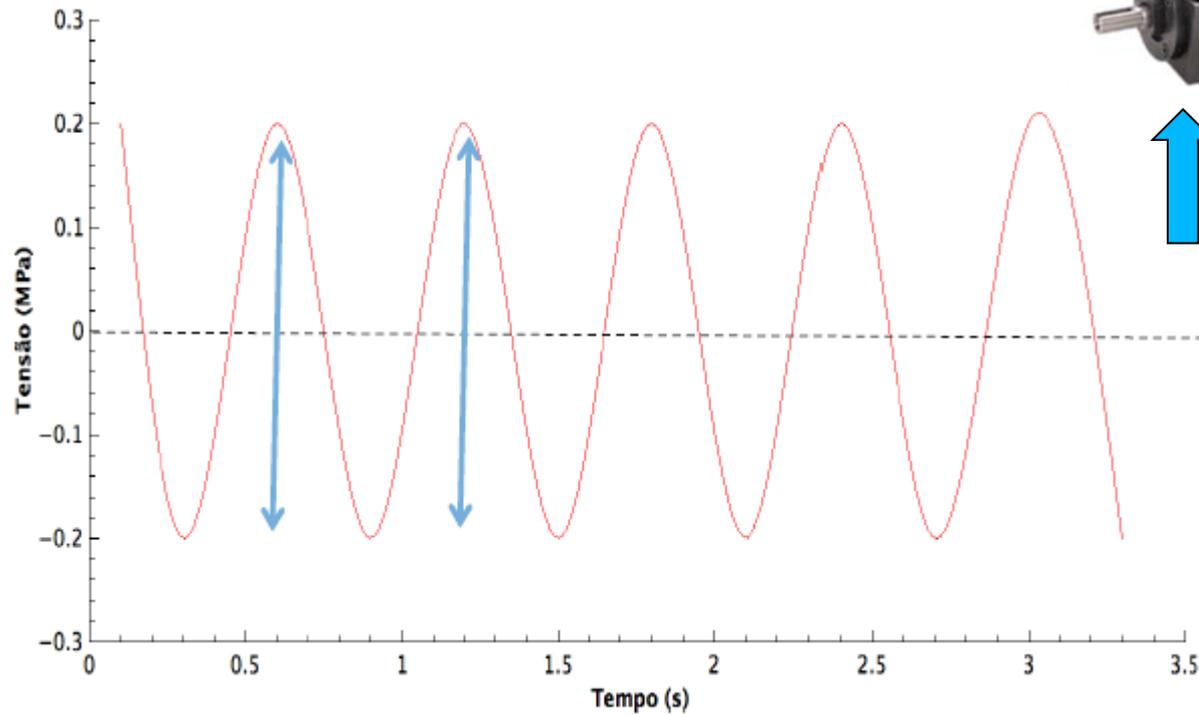
Vibrações





Fadiga

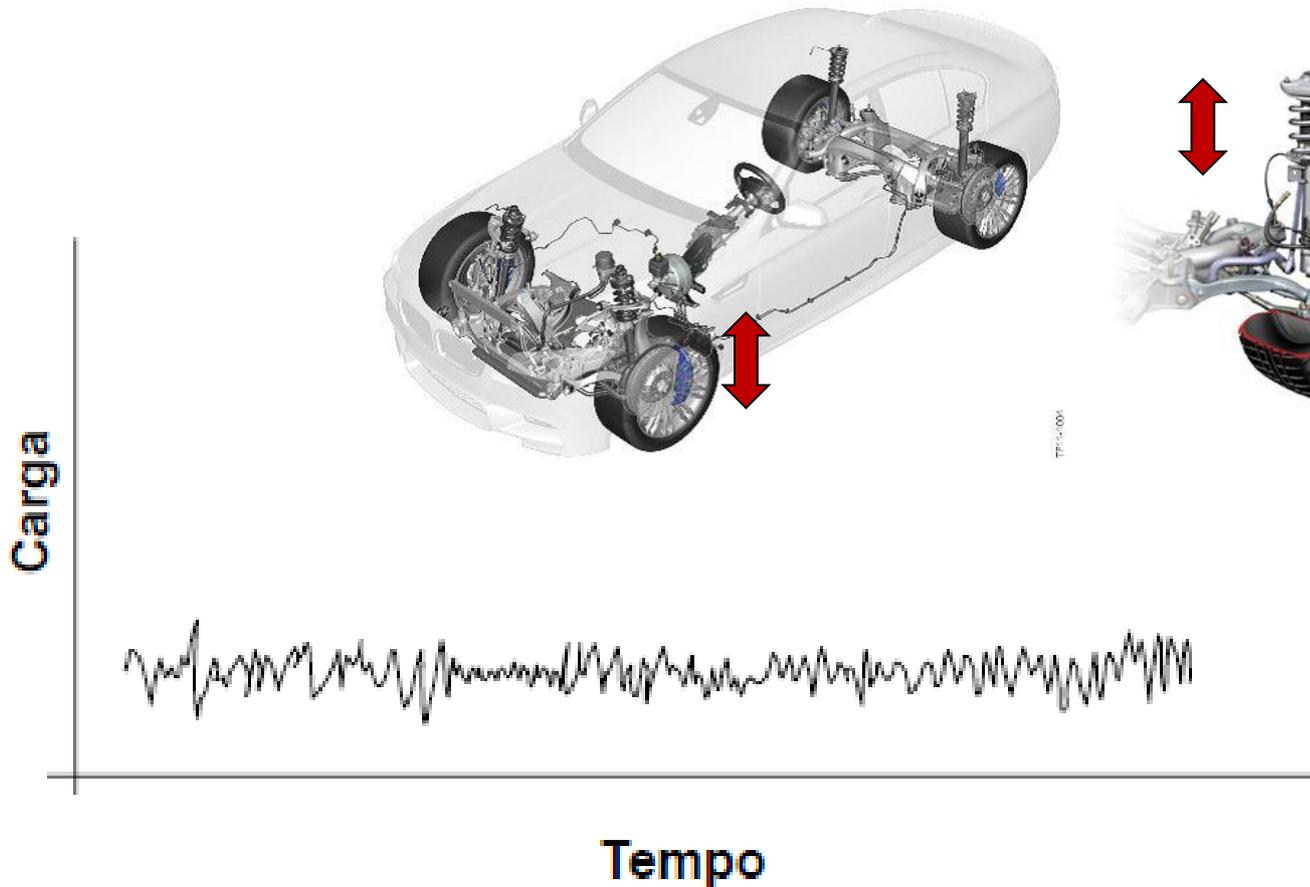
Carregamento constante





Fadiga

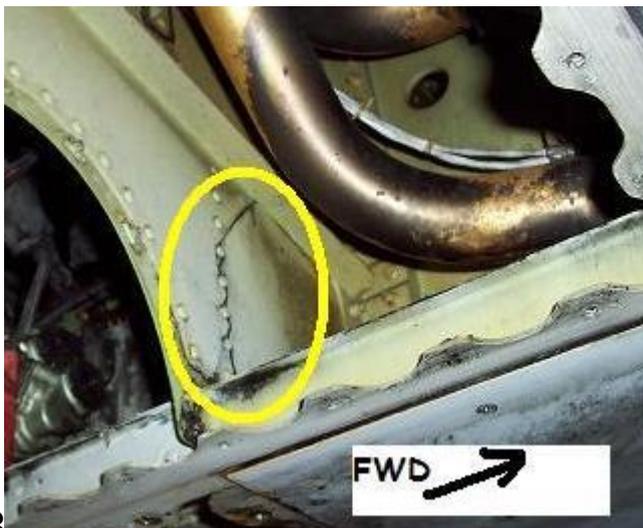
Carregamento variável



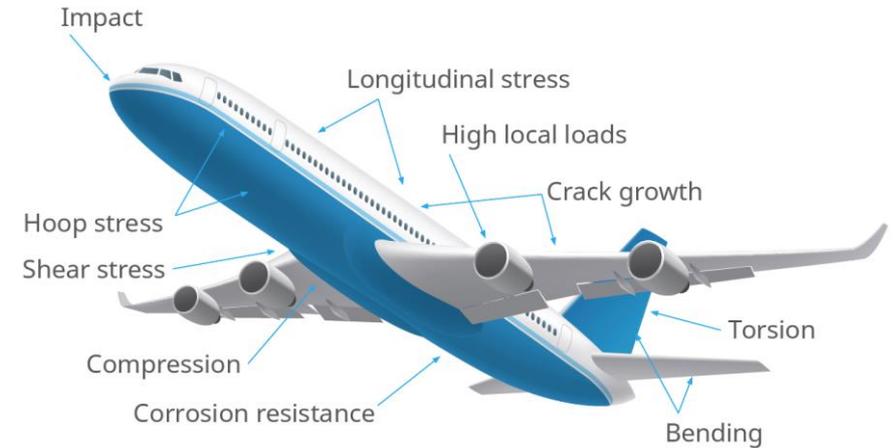
Característico
Tempo X Carga
para o eixo da roda



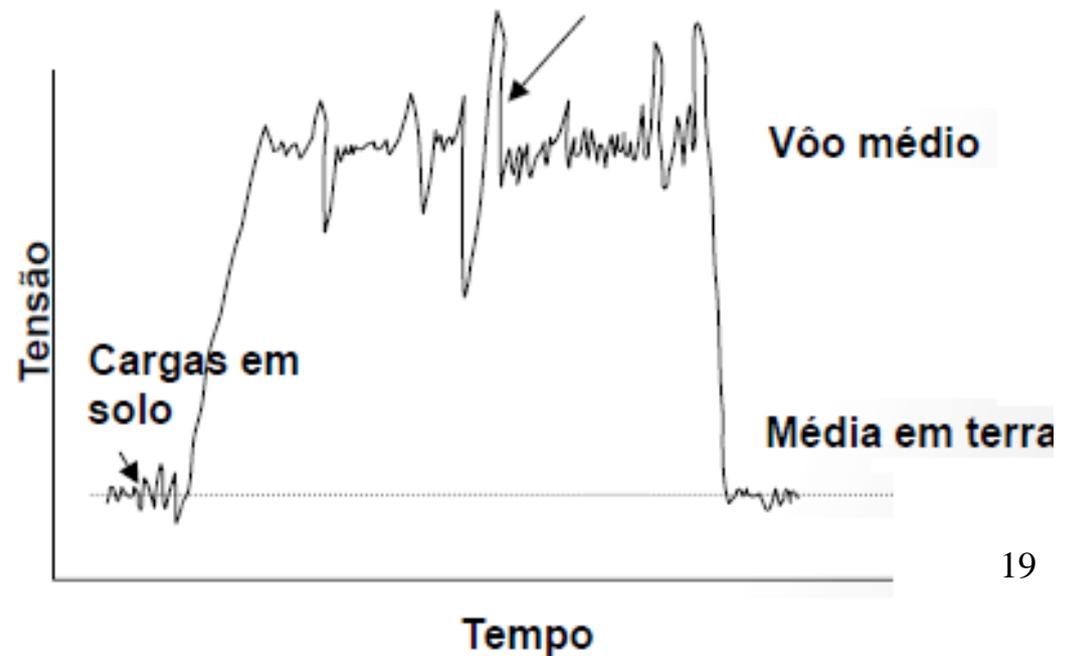
Carregamento variável



Fadiga



Carregamento em voo





Filosofias de projeto para Fadiga

Vida Infinita

Este critério exige que as tensões atuantes estejam abaixo da tensão limite de fadiga

Vida Finita

Condições de carregamento sensivelmente imprevisíveis, ou ao menos, não constantes. A vida selecionada para o projeto deve incluir uma margem de segurança para levar em consideração o carregamento

Falha segura

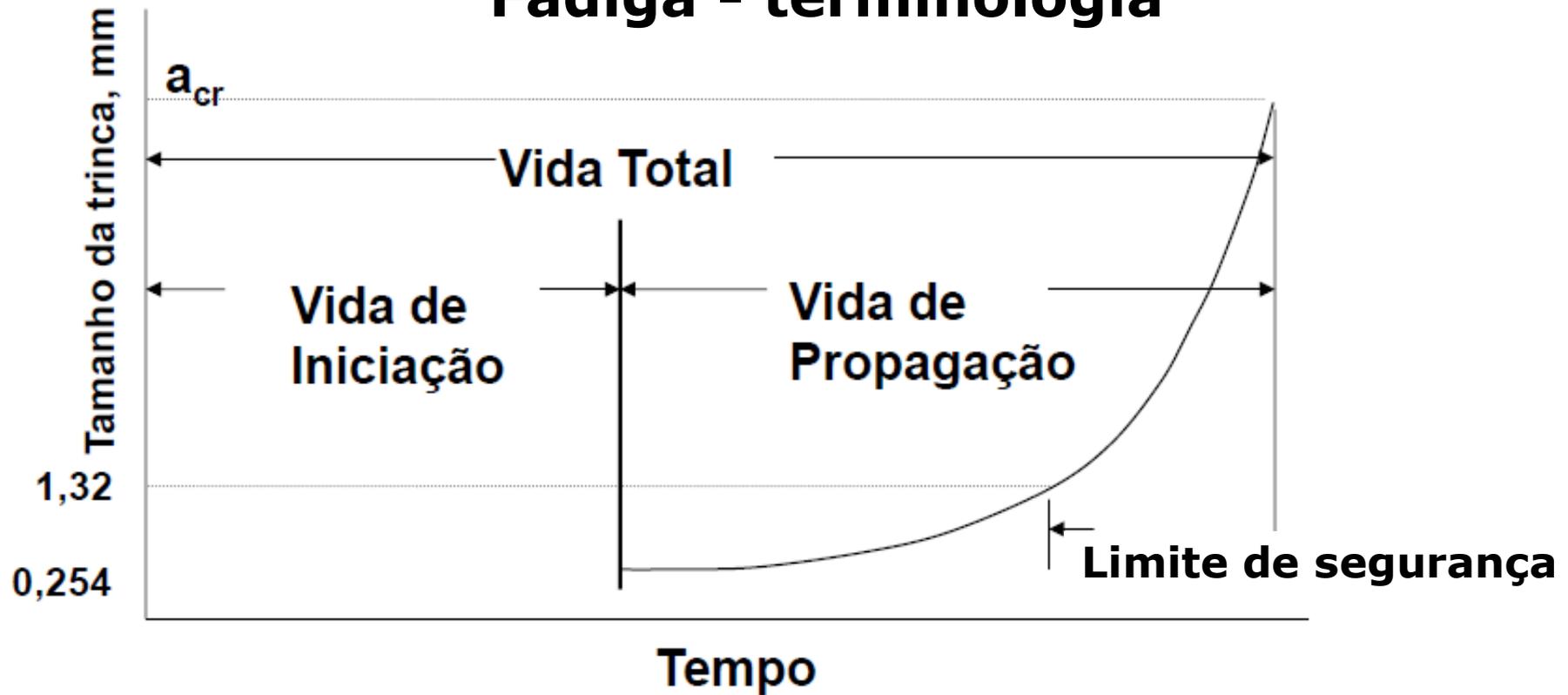
Este critério considera a possibilidade de ocorrência de trincas de fadiga, porém, sem levar ao colapso as estruturas antes destas fissuras serem detectadas e reparadas

Tolerante ao dano

Este critério é um refinamento do anterior, porém, levando em consideração a existência de uma trinca, o projeto da estrutura é executado para que esta trinca não cresça, evitando a falha do componente.



Fadiga - terminologia

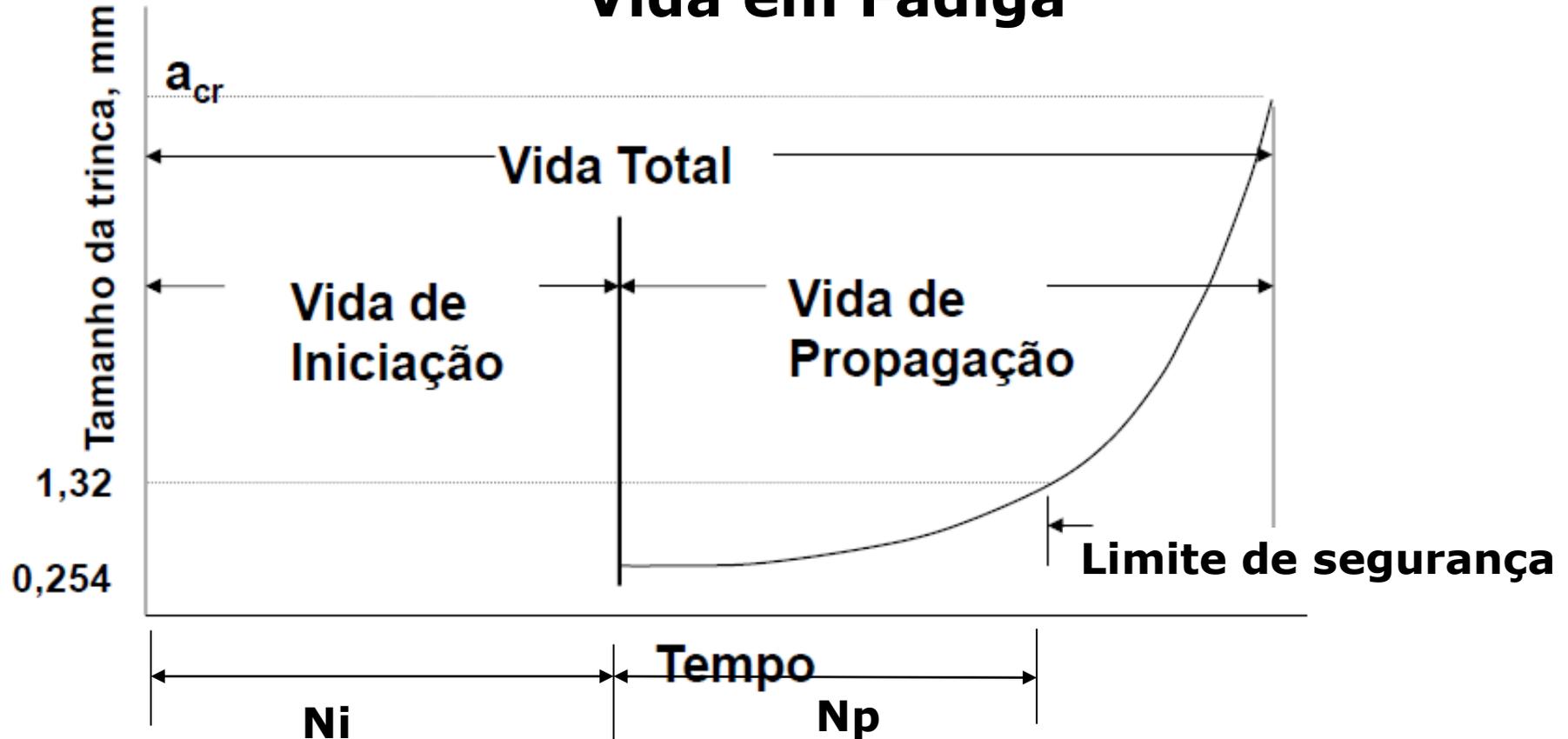


Onde:

- Vida de Iniciação – Tempo para nuclear uma trinca.
- Vida de Propagação – Tempo para o crescimento de uma trinca até a falha.
- Limite de Seg. – crescimento a partir de um tamanho crítico de trinca



Vida em Fadiga



Onde:

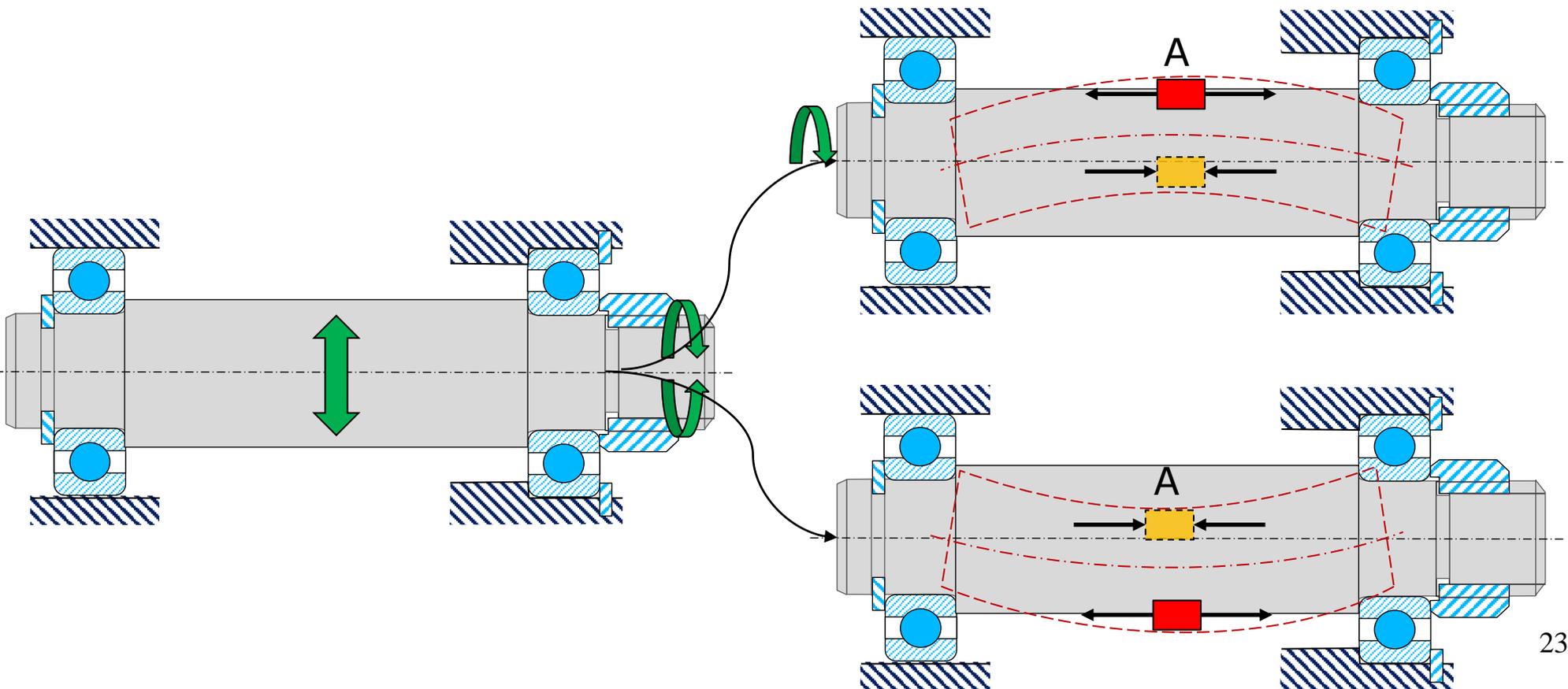
$$N = N_i + N_p$$

- N é o número de ciclos para fadiga total;
- N_i é o número de ciclos para iniciação;
- N_p é o número de ciclos para uma trinca crescer e se tornar crítica



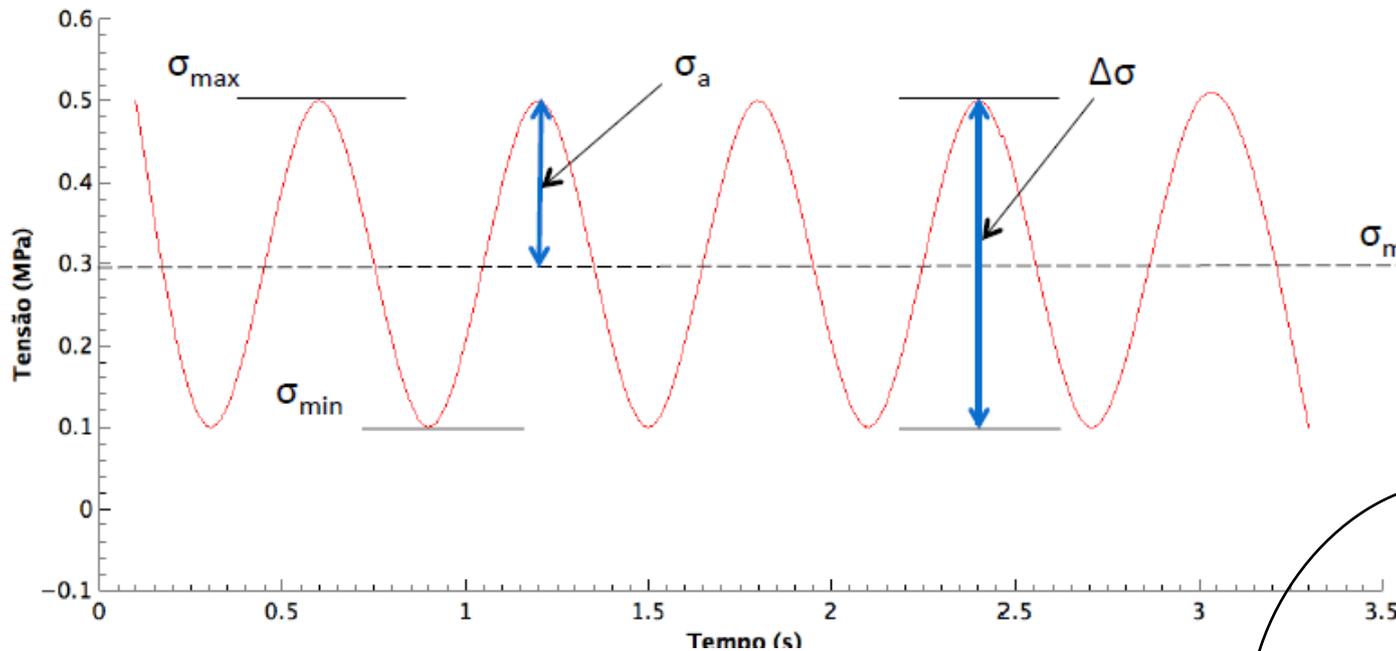
Tensões Cíclicas

As tensões cíclicas podem ser de natureza axial (tração-compressão), de flexão (flexão) ou torcional (torção).





Parâmetros dos Ciclos de Fadiga



$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$$

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$$

σ_{max} : Tensão máxima

σ_a : Amplitude de tensão

σ_{min} : Tensão mínima

σ_m : Tensão média

$\Delta\sigma$: intervalo ou amplitude de tensão

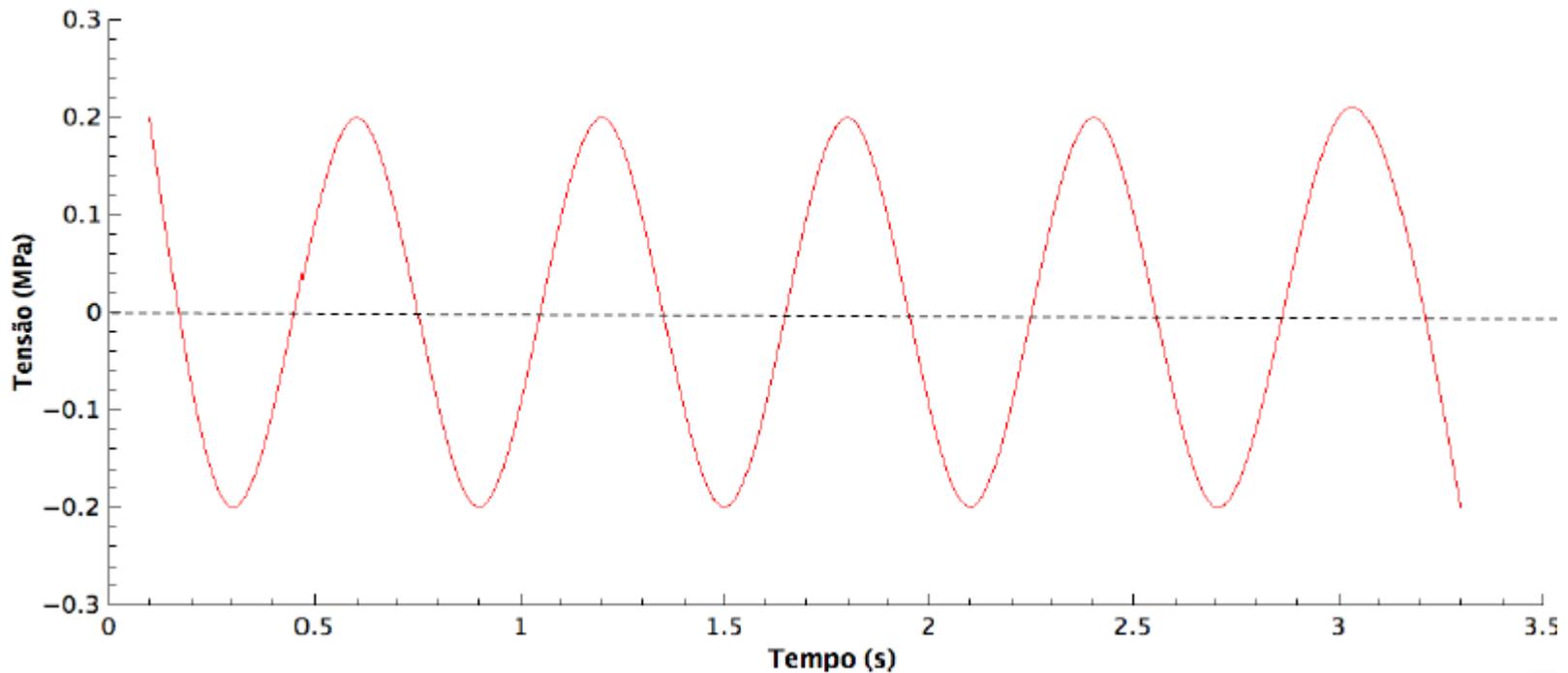
$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$$

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} \quad A = \text{Razão de amplitude}$$

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad R = \text{Razão de tensão}$$



Carregamentos completamente reversos



$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} = 0$$

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = -1$$

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} = \infty$$

A = Razão de amplitude

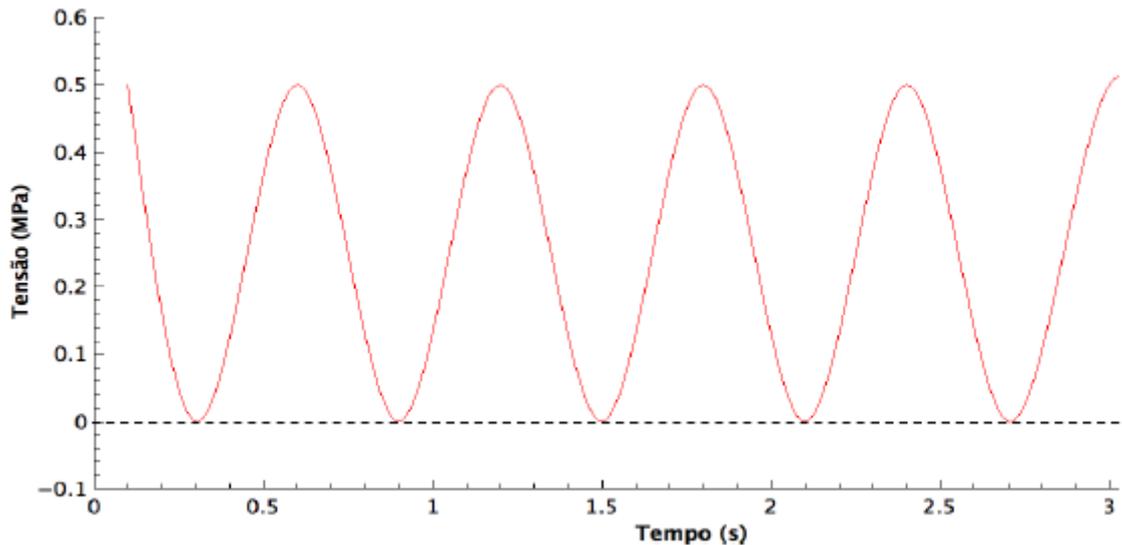
R = Razão de tensão ²⁵



R = Razão de tensão

A = Razão de amplitude

Carregamentos 0 a tração

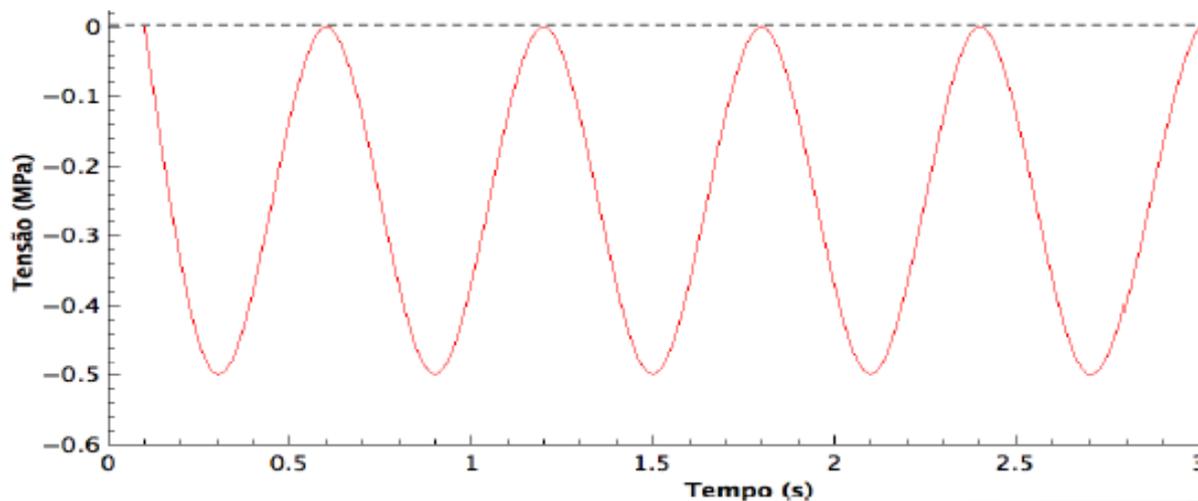


$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max}}{2}$$

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = 0$$

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} = 1$$

Carregamentos 0 a compressão



$$\sigma_m = \frac{\sigma_{min}}{2}$$

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = \infty$$

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} = 1$$



Cálculo do número de ciclos

Existem basicamente dois métodos para cálculo de vida em fadiga:

⇒ um baseado na **análise da curva S-N** (tensão-vida),

⇒ e outro baseado na **taxa de propagação da trinca.**

O método para calcular o número de ciclos que um componente resiste a fadiga depende da filosofia de projeto selecionado.



Análise da curva S-N (tensão-vida)

A metodologia de **Análise da curva S-N** é utilizada quando os níveis de tensão são muito inferiores ao limite de escoamento do material.

É também denominada de Fadiga de Alto Ciclo (FAC) ou Fadiga em Baixa Tensão (FBT).

- Dados S-N

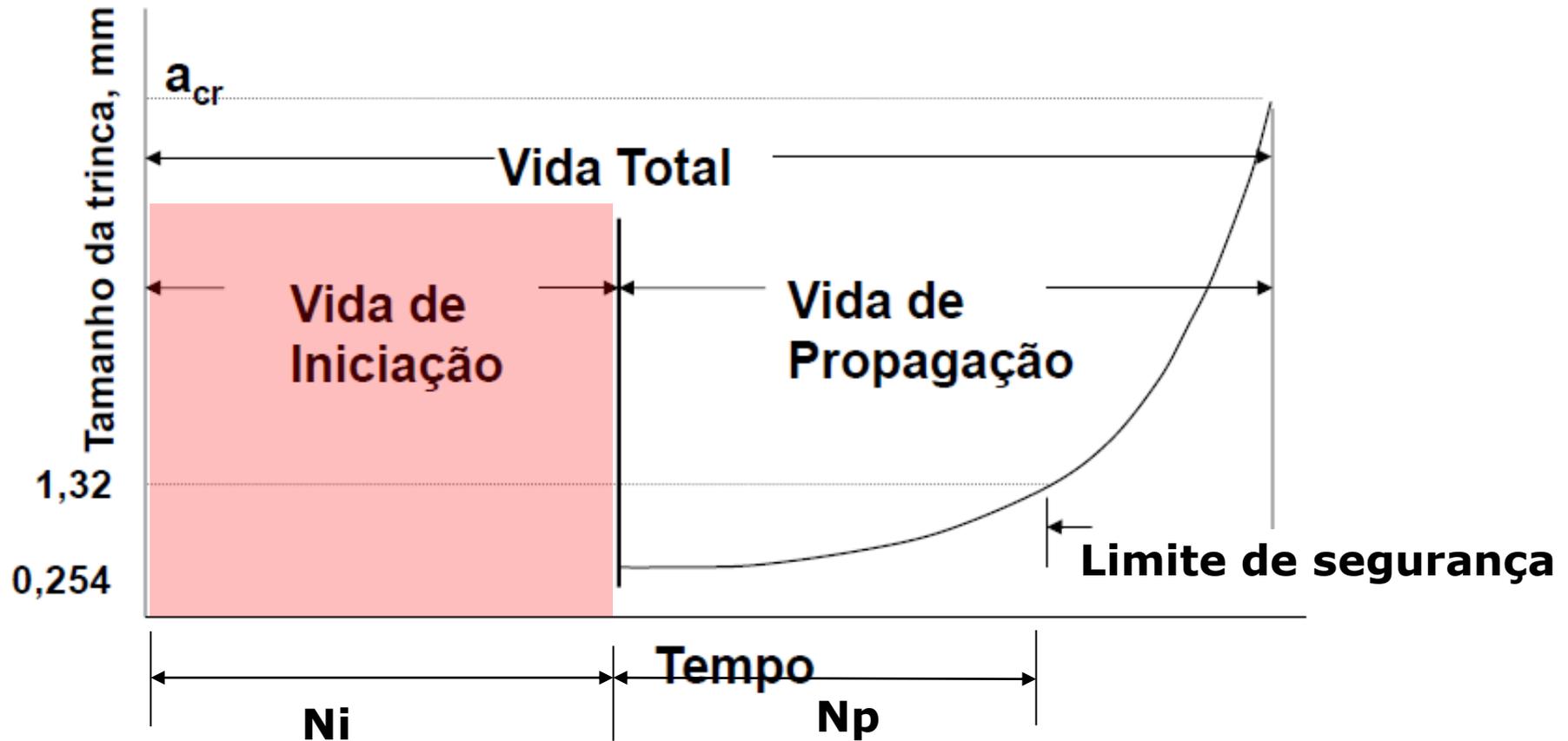
- Limite de Fadiga
- Resistência a Fadiga
- Vida Finita
- Relação entre Propriedades Estática & Fadiga
- Efeitos da Tensão Média

- Modelos:

- Vida infinita
- Vida finita



Análise da curva S-N (tensão-vida)

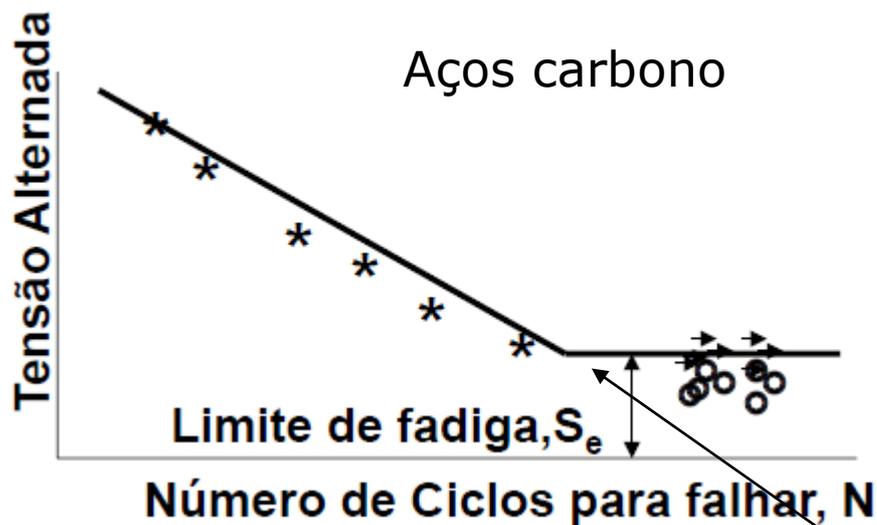




Análise da curva S-N e Limite de Fadiga

Os dados de fadiga são normalmente apresentados:

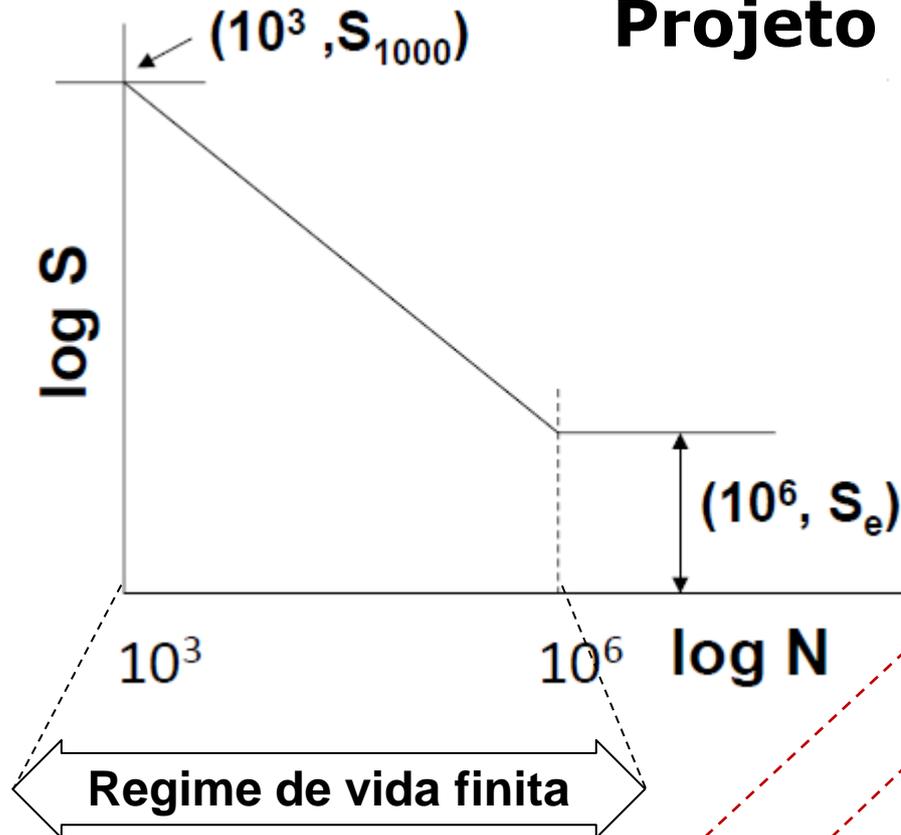
- para corpos de prova polidos
- Sob flexão reversa



Limite de fadiga



Projeto para vida Finita



$$S = 10^c \cdot N^b$$

$$N = 10^{c/b} \cdot S^{1/b}$$

$$S_{1000} = \text{tensão de falha em } 10^3$$

Onde:

- C e b são constantes do material, e podem ser expressos em termos de S_{1000} e S_e
- S_{1000} é a tensão para falha em 10^3 ciclos
- S_e é a tensão para falha com tensão média zero



Projeto para vida Finita

$$S = 10^c \cdot N^b$$

$$C = \log_{10} \frac{(S_{1000})^2}{S_c}$$

$$b = \frac{1}{3} \log_{10} \left(\frac{S_{1000}}{S_c} \right)$$

Notem que: $S_{1000} \approx 0,9 S_o$ e $S_e \approx 0,5 S_o$

Assim, para ligas ferrosas temos:

$$b \approx -0,0855$$

$$C = \log_{10} (1,62 S_u)$$

$$S = 1,62 S_u N^{-0,085}$$

$$N = 291,66 \left(\frac{S}{S_u} \right)^{-11,765}$$

ligas ferrosas



Projeto para vida Finita

Limite de Fadiga e Propriedades Estáticas

Atenção: Estas são relações empíricas

Para Ligas Ferrosas => Corpo de Prova polido sob flexão reversa

Em termo de tensão limite de resistência, S_u

$$S_e = 0,5 * S_u, \text{ para } S_u \leq 1400 \text{ MPa}$$

$$S_e = 700 \text{ MPa}, \text{ para } S_u > 1400 \text{ MPa}$$

Em termo de dureza Brinell

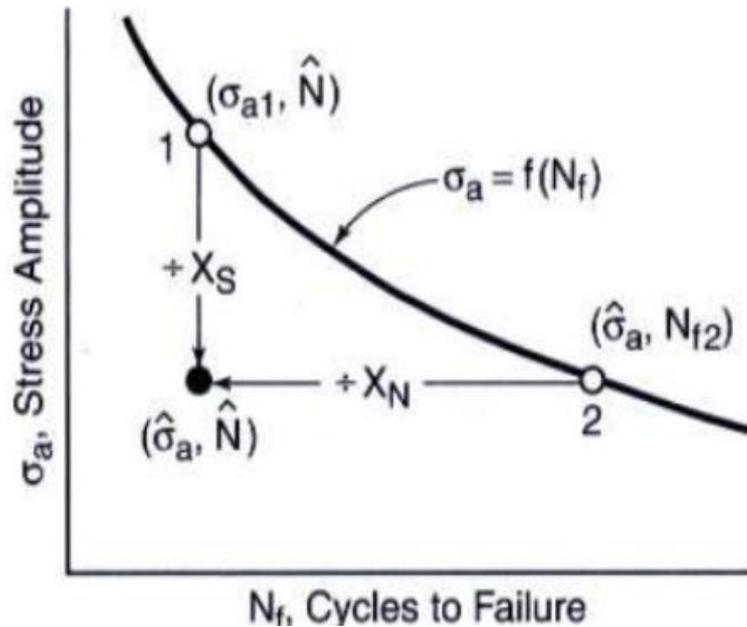
$$S_e = 0,25 * BHN, \text{ para } BHN \leq 400$$

$$S_e = 100 \text{ ksi}, \text{ para } BHN > 400$$

$$\text{Note, } S_u = 0,5 * BHN$$



Coeficiente de segurança



$$X_S = \frac{\sigma_{a1}}{\hat{\sigma}_a} \dots \dots (N_f = \hat{N})$$

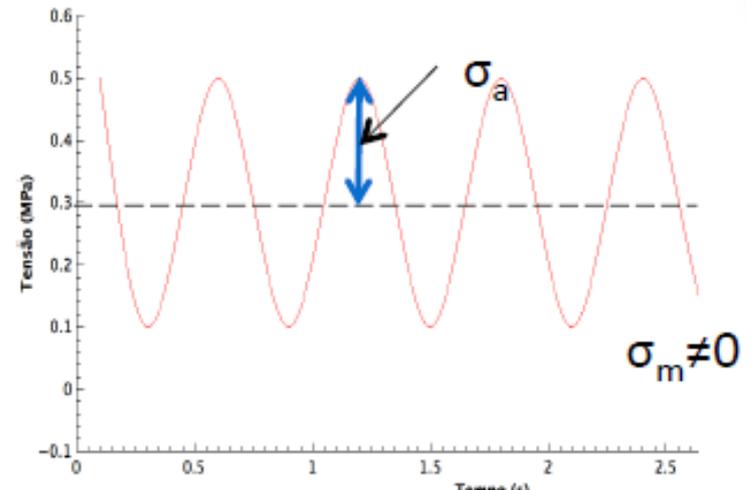
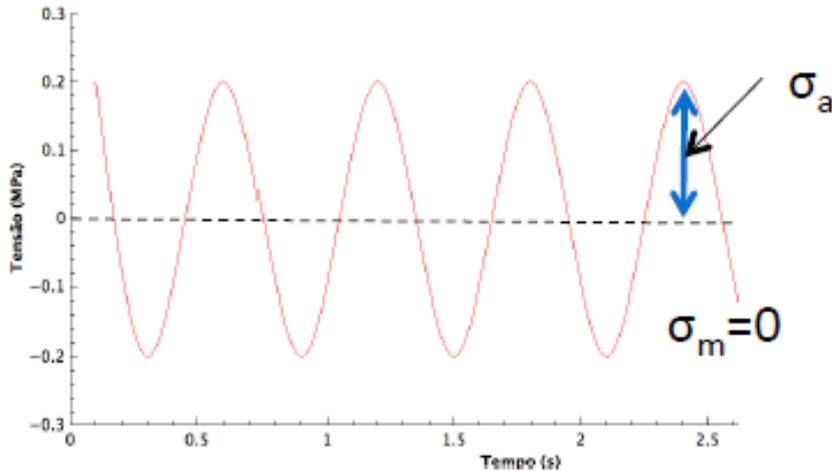
$$X_N = \frac{N_{f2}}{\hat{N}} \dots \dots (\sigma_a = \hat{\sigma})$$

$$X_S = 1,5 \text{ a } 3$$

$$X_N = 5 \text{ a } 20 (+)$$



Efeito da tensão média



$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$$

O aumento do valor da tensão média diminui a vida em fadiga

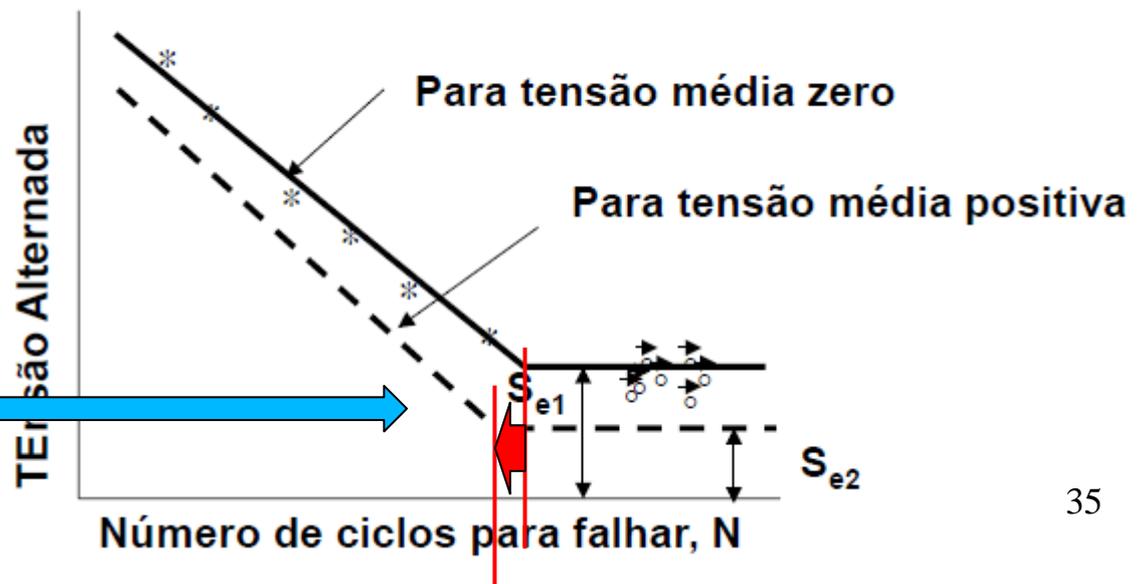
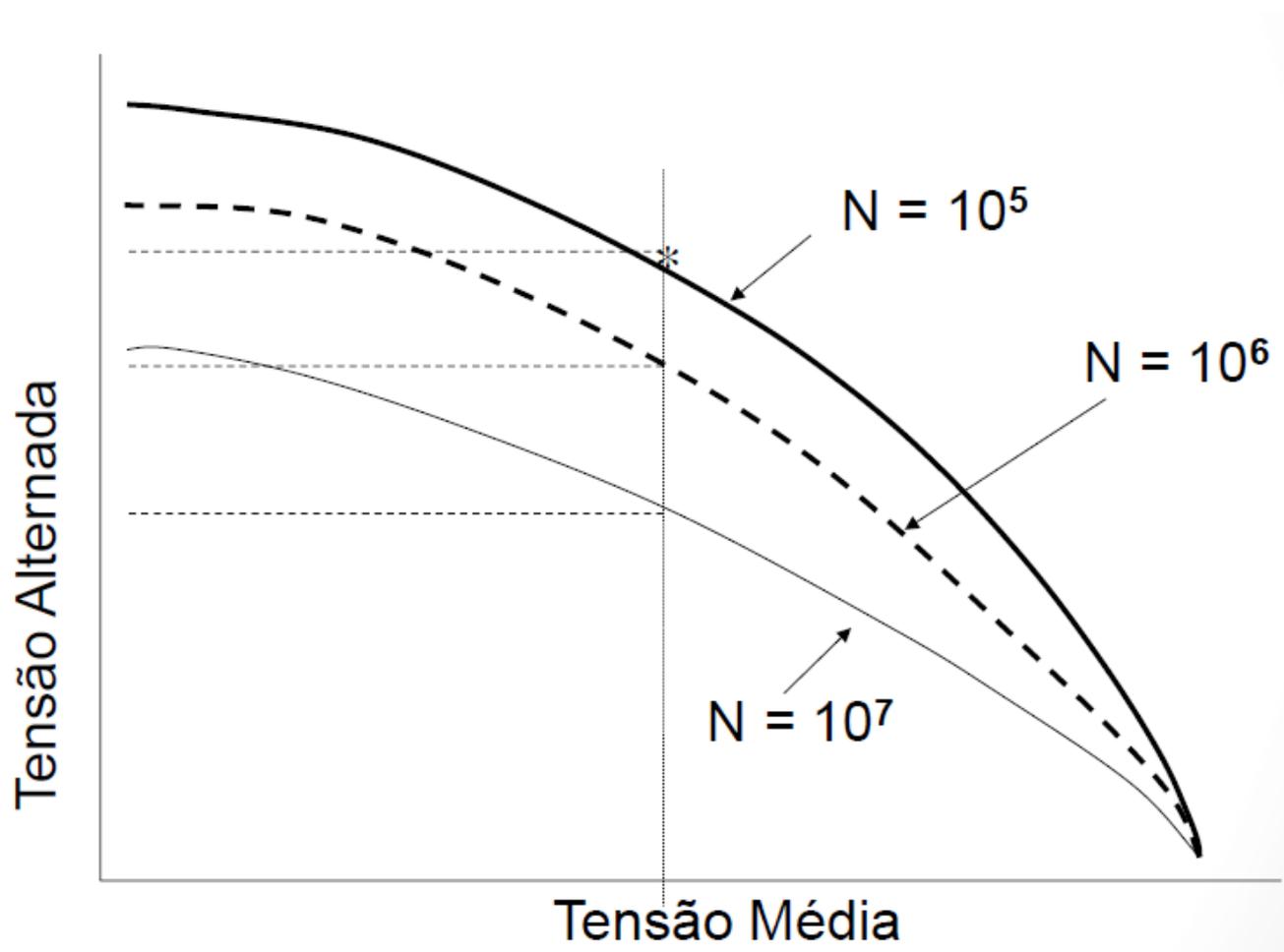




Diagrama de Vida Constante ou diagrama de Haigh





Modelo de fadiga para vida finita

Soderberg (1930): $\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_y} = 1$

Goodman (1899): $\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_u} = 1$

Gerber (1874): $\frac{\sigma_a}{S_e} + \left(\frac{\sigma_m}{S_u}\right)^2 = 1$

Morrow (1960's): $\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{\sigma_f} = 1$

Onde:

S_e : Limite de fadiga para tensão média igual a zero;

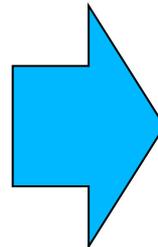
σ_a : Limite de fadiga com tensão diferente de zero;

S_u : Limite de resistência em tração;

S_y : Tensão limite;

σ_m : Tensão média;

σ_f : Tensão de fratura verdadeira



Para vida infinita
troque o limite de
fadiga S_e por S_n



Exemplo 1

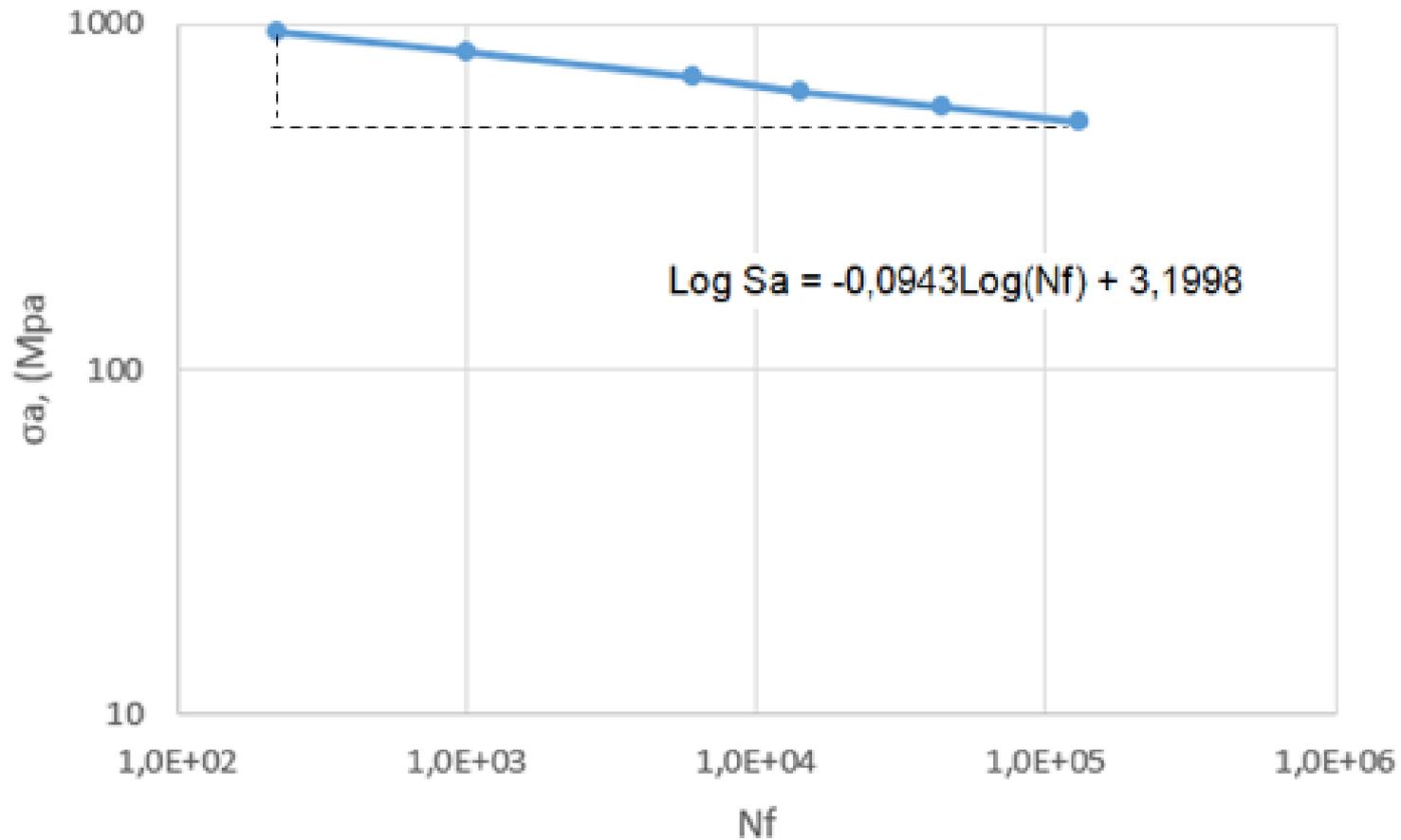
Alguns valores de amplitude de tensão e os ciclos correspondentes para falha em fadiga são dados na tabela abaixo para o aço ABNT AISI 4340. Estes ensaios foram realizados em corpos de prova não entalhados, carregados axialmente e com tensão média igual a zero.

σ_a , (MPa)	N_f , ciclos	σ_a , (MPa)	N_f , ciclos
948	222	631	14130
834	992	579	43860
703	6004	524	132150



Exemplo 1

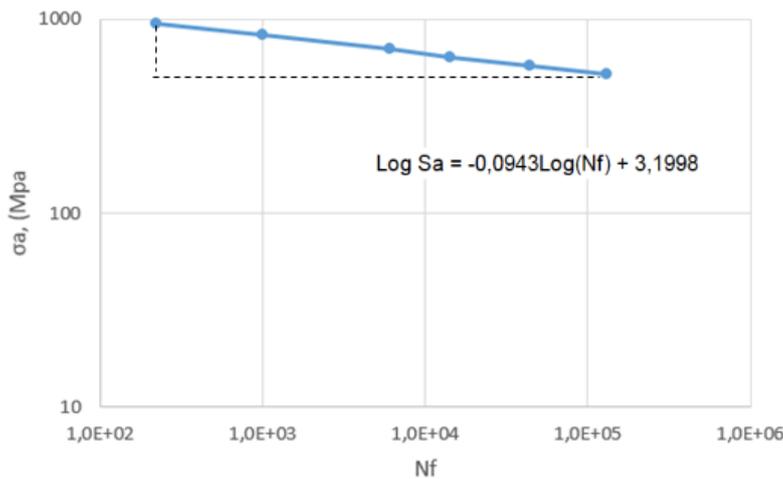
a) Plote o gráfico de $\sigma_a X N_f$ (Log-Log).





Exemplo 1

b) Obtenha os valores refinados de A e B usando a regressão linear dos mínimos quadrados a partir do gráfico



$$\sigma_a = AN_f^B$$

$$N_f = \left(\frac{\sigma_a}{A} \right)^{1/B} \rightarrow \log N_f = \frac{1}{B} \log \sigma_a - \frac{1}{B} \log A$$

$$y = mx + c \rightarrow y = \log N_f; \quad x = \log \sigma_a; \quad m = \frac{1}{B}; \quad c = \frac{-1}{B} \log A$$

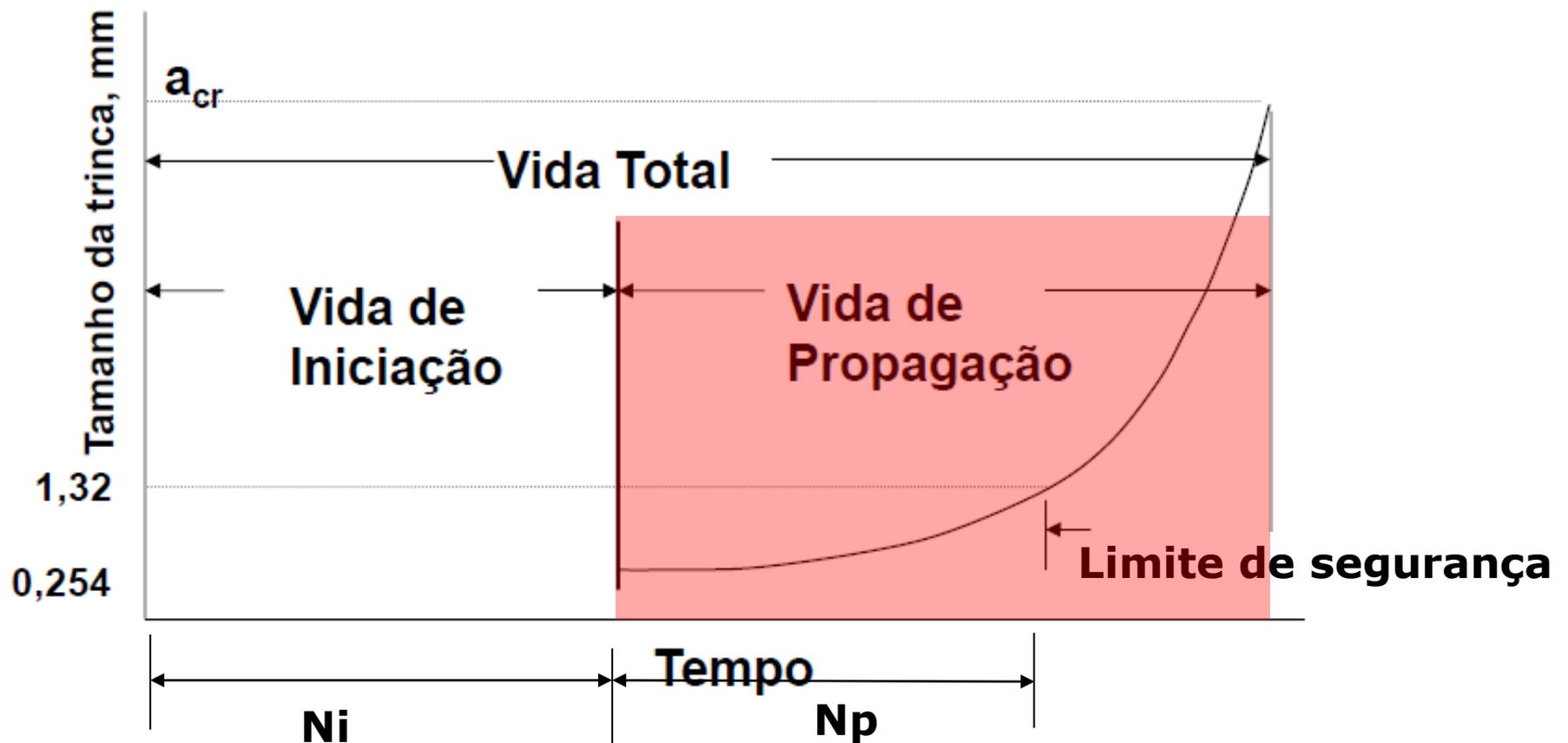
$$m = -10,582; \quad c = 33,87$$

$$B = -0,0945$$

$$A = 10^{-cB} \rightarrow A = 1587 \text{ MPa}$$



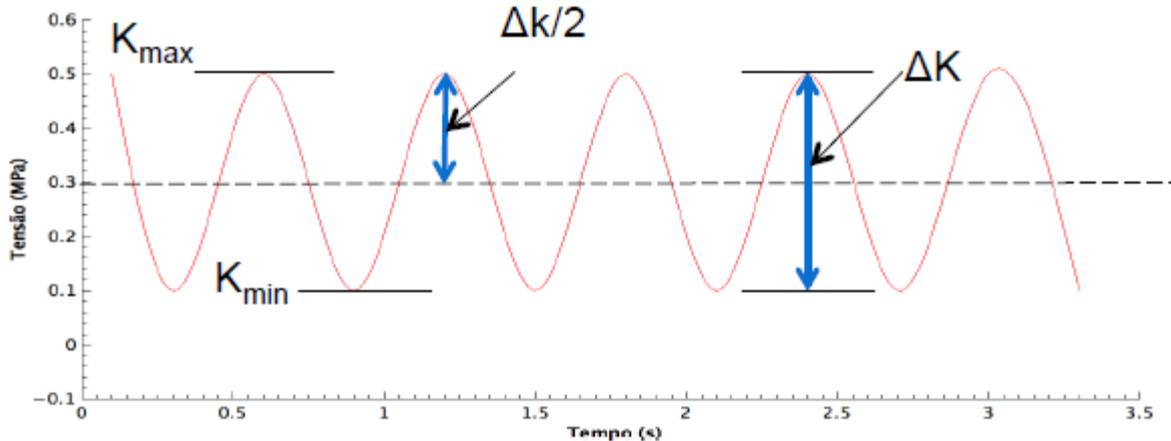
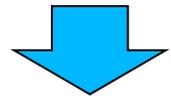
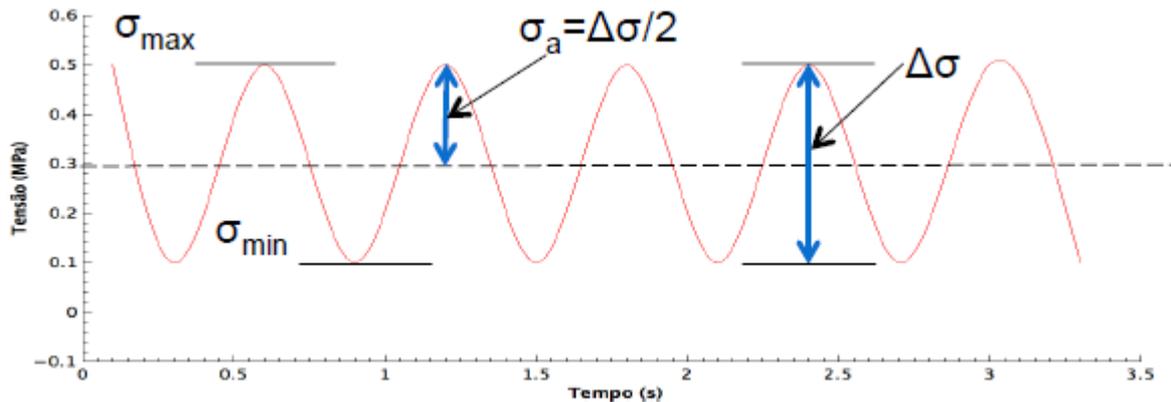
Modelo de vida baseado na taxa de propagação da trinca





Modelo de vida baseado na taxa de propagação da trinca

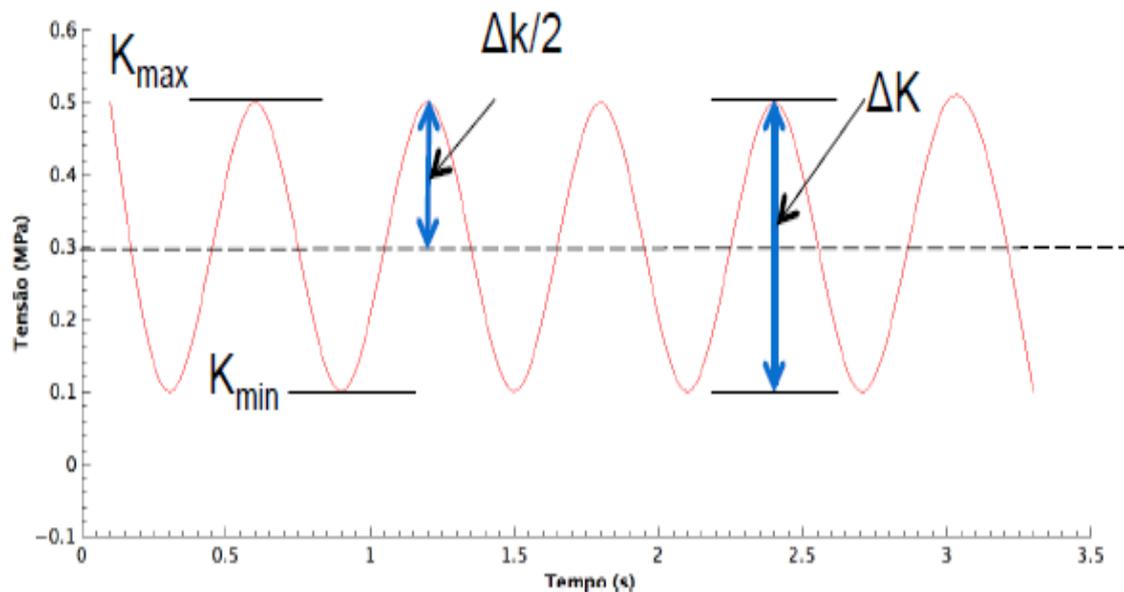
Parâmetros utilizados na descrição do crescimento de trinca por fadiga





Modelo de vida baseado na taxa de propagação da trinca

Parâmetros utilizados na descrição do crescimento de trinca por fadiga



$$K_{\max} = \sigma_{\max} \sqrt{\pi * a}$$

$$K_{\min} = \sigma_{\min} \sqrt{\pi * a}$$

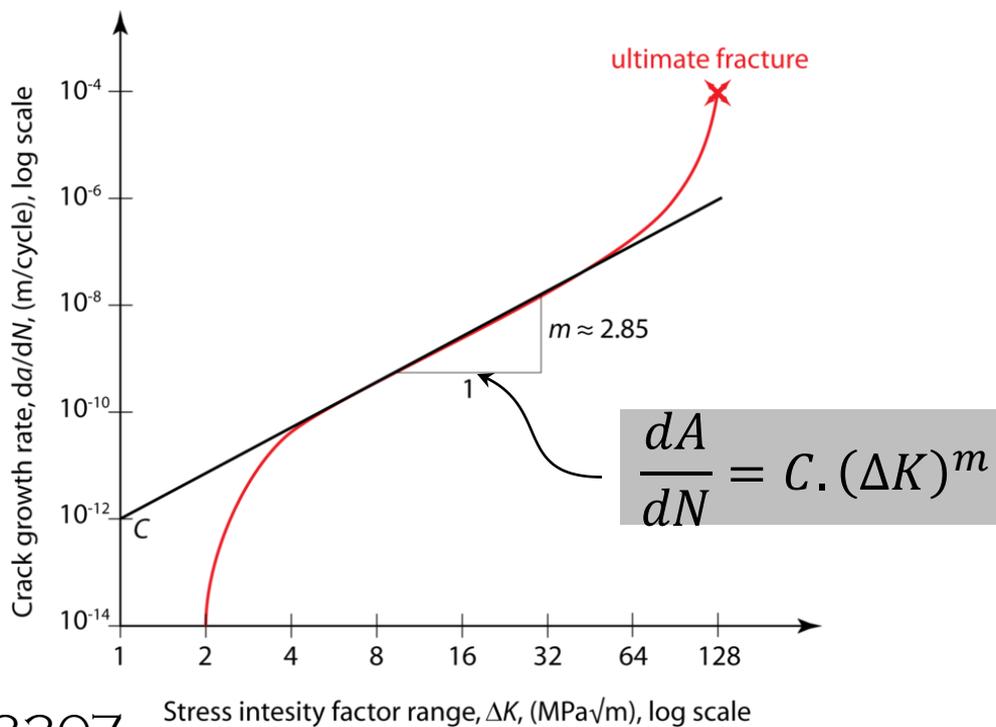
$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} = \Delta \sigma \sqrt{\pi * a}$$

$$R = \frac{K_{\min}}{K_{\max}}$$



Modelo de vida baseado na taxa de propagação da trinca

A taxa de propagação de trinca foi equacionada pela primeira vez por Paul Paris, em 1960, que deu origem a Equação de Paris.



Onde: C e m são constantes do material.



Modelo de vida baseado na taxa de propagação da trinca

ΔK é a variação do fator de intensidade de tensão na ponta da trinca e é calculada por:

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$$

ou

$$\Delta K = F(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})\sqrt{\pi \cdot a}$$



Cálculo da vida em fadiga pela método $\frac{da}{dN}$

$$dN = \frac{da}{C \cdot (\Delta K)^m}$$

$$N_f = \int_0^{N_f} dN$$

$$N_f = \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{C \cdot (\Delta K)^m}$$

$$N_f = \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{C \cdot (F(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})\sqrt{\pi \cdot a})^m}$$

$$N_f = \frac{1}{C \pi^{\frac{m}{2}} (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})} \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{F \cdot a^{\frac{m}{2}}}$$

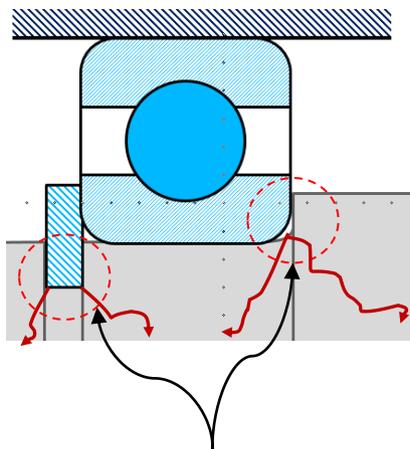


Falha por Fadiga

- ▶ As falhas por fadiga se iniciam na superfície ou logo abaixo desta com trincas microscópicas

- **onde?** Pontos de concentração de tensões

- furos
- rasgos de chaveta
- mudança diâmetros
- entalhes
- defeitos superficiais



Concentradores
de tensões

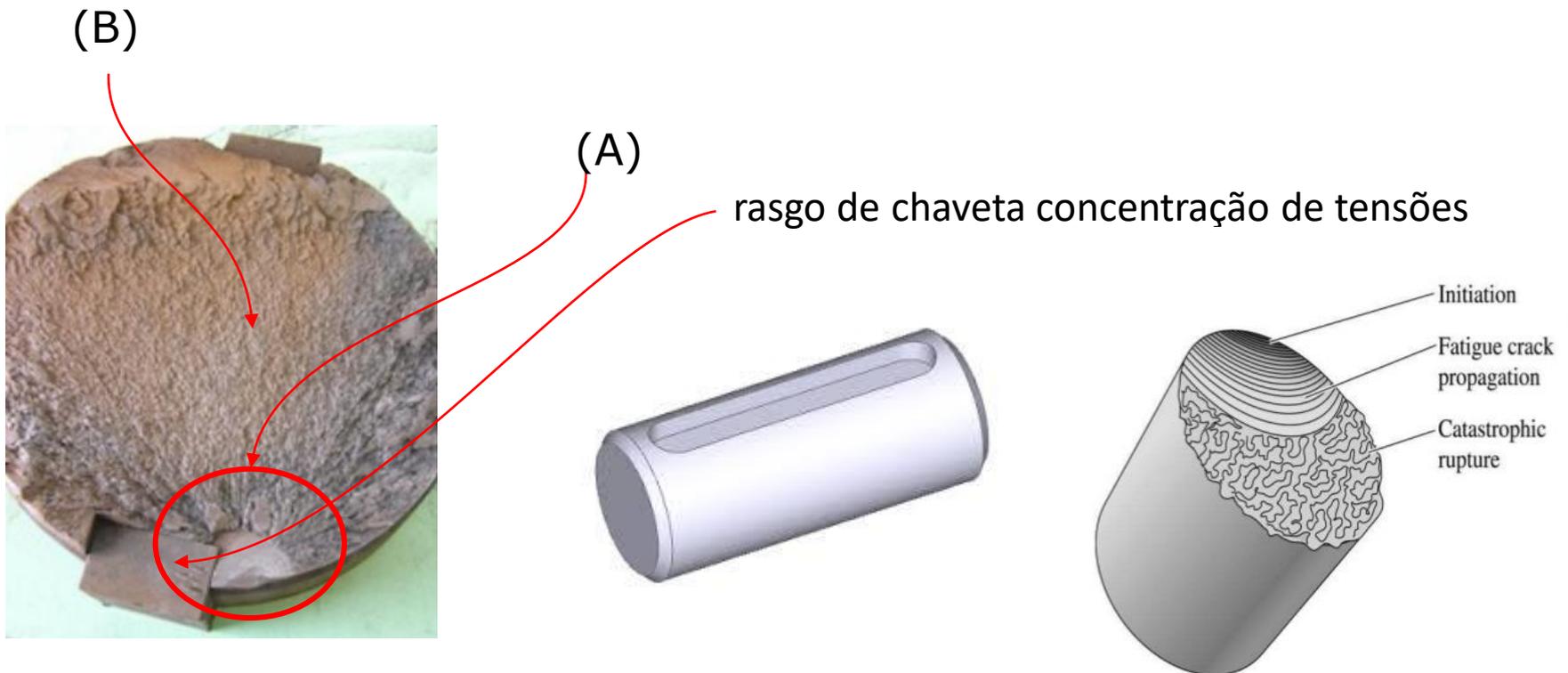


Falha por Fadiga

- ▶ Progridem lentamente e falham repentinamente

A- região polida devido ao “abre-fecha”

B- região fosca ruptura violenta





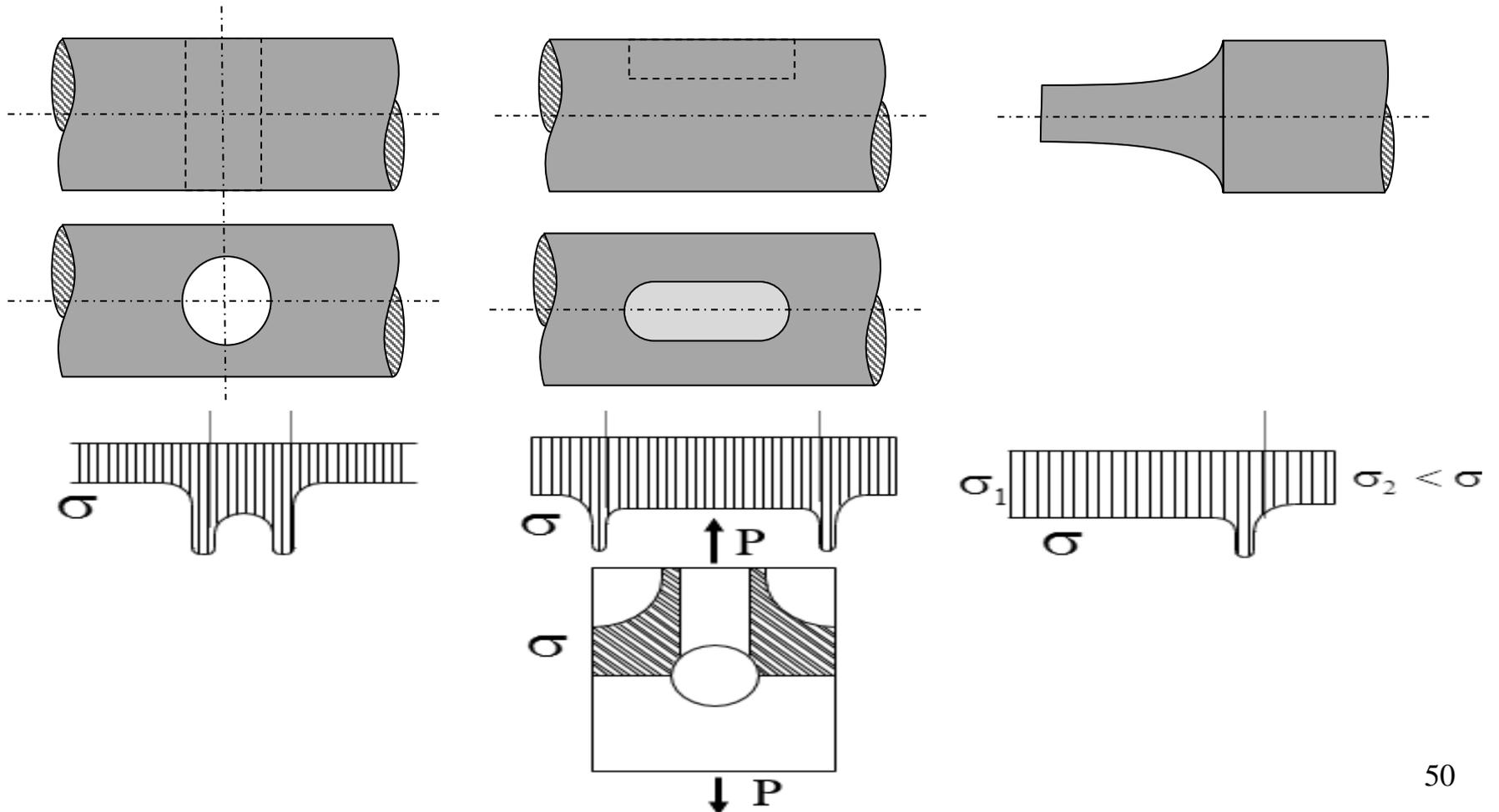
Fatores que contribuem para Fadiga

- grande diferença entre σ_{\min} e σ_{\max}
- grande número de ciclos
- tipo de material (aço , alumínio , plástico , etc)



Fatores que aceleram a Fadiga

- concentradores de tensões (macro geometria)





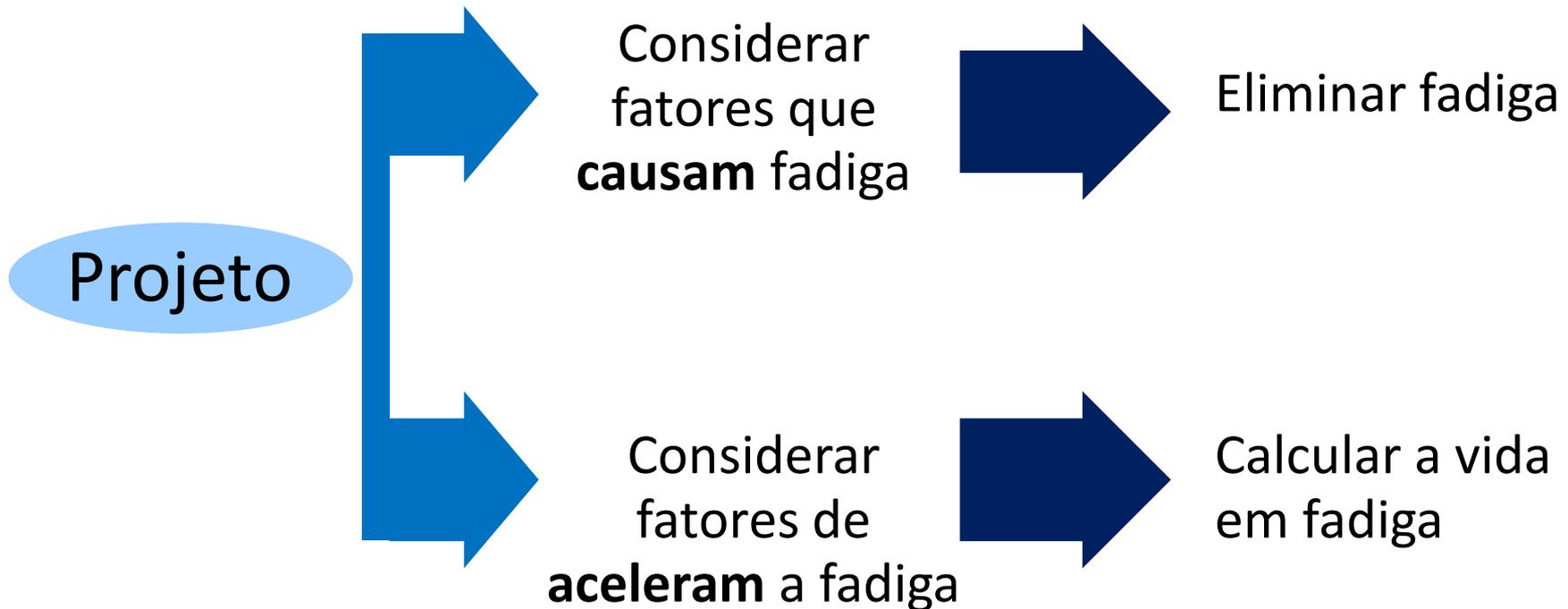
Fatores que aceleram a Fadiga

- imprecisões metalúrgicas (ex. composição , dureza , ...)
- presença de fases duras
- variações cíclicas de temperatura
- acabamento superficial
- corrosão
- tensões residuais, originária de processos de fabricação, danos, etc. (ex. temperas localizadas, deformações plásticas por choque, danos de outras naturezas)
- Sobrecarga



Fatores que aceleram a Fadiga

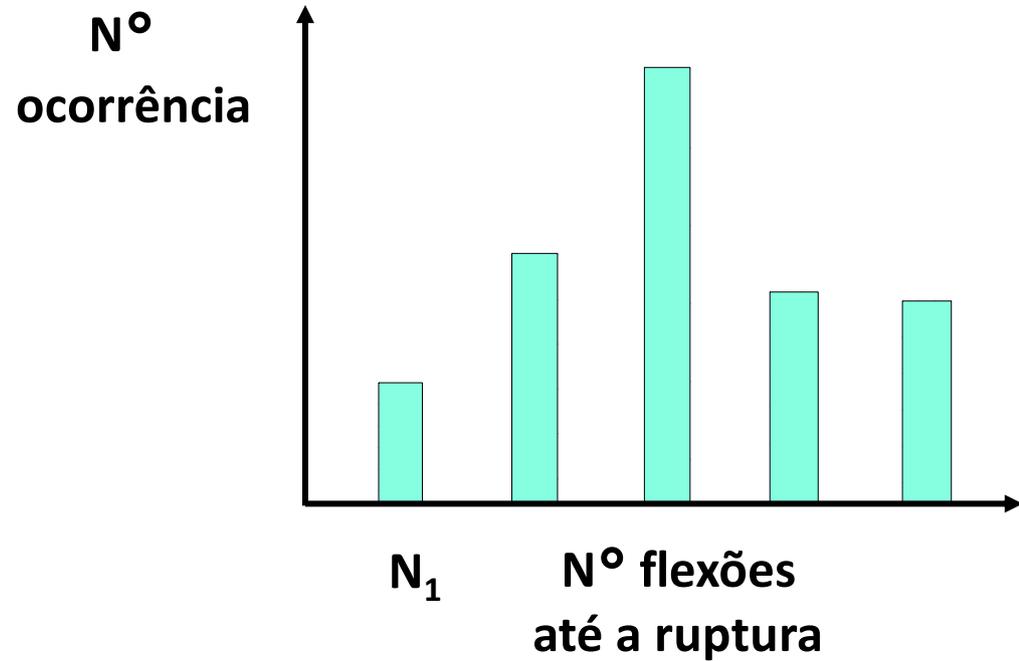
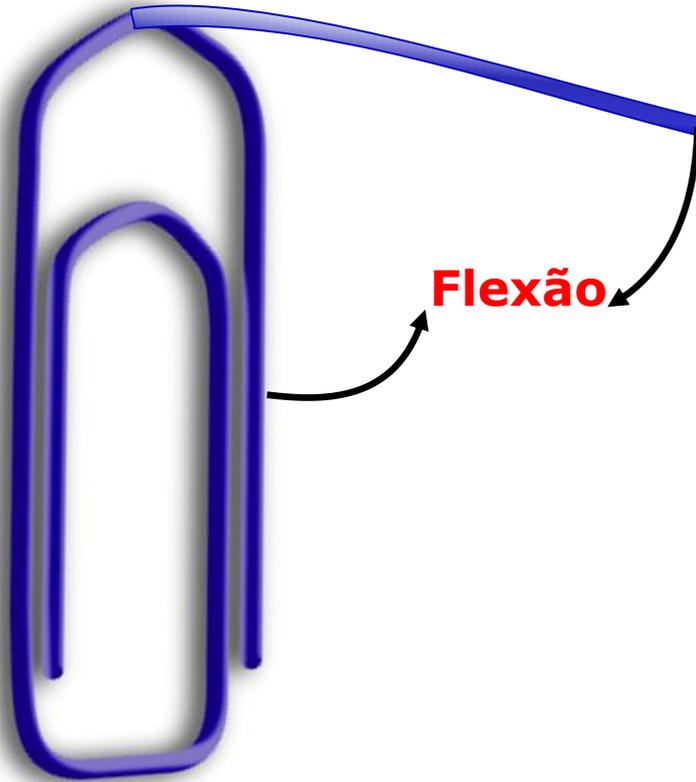
- **OBSERVAÇÃO:** frequência (tempo do ciclo) não tem influência





Curva de Wohler ou diagrama S-N

► Problema 1

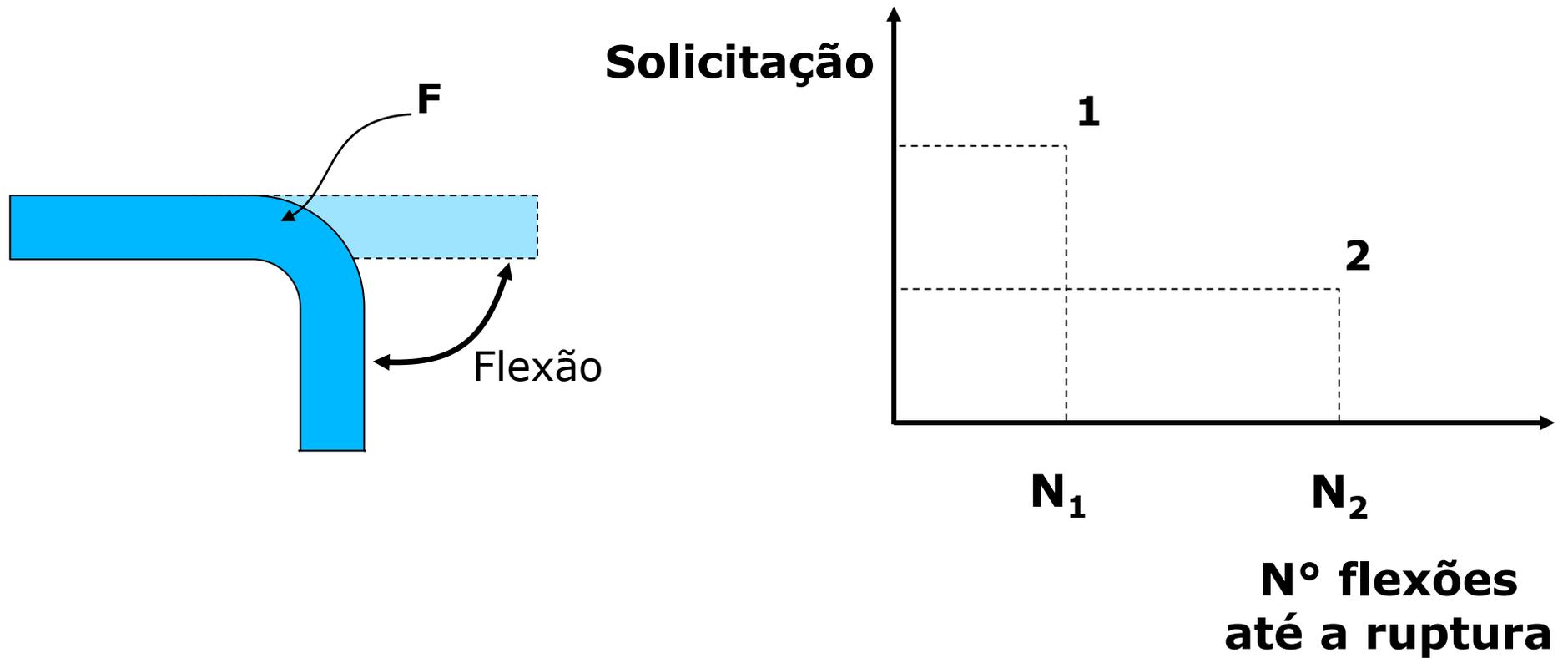


► fenômeno estatístico!



Curva de Wohler ou diagrama S-N

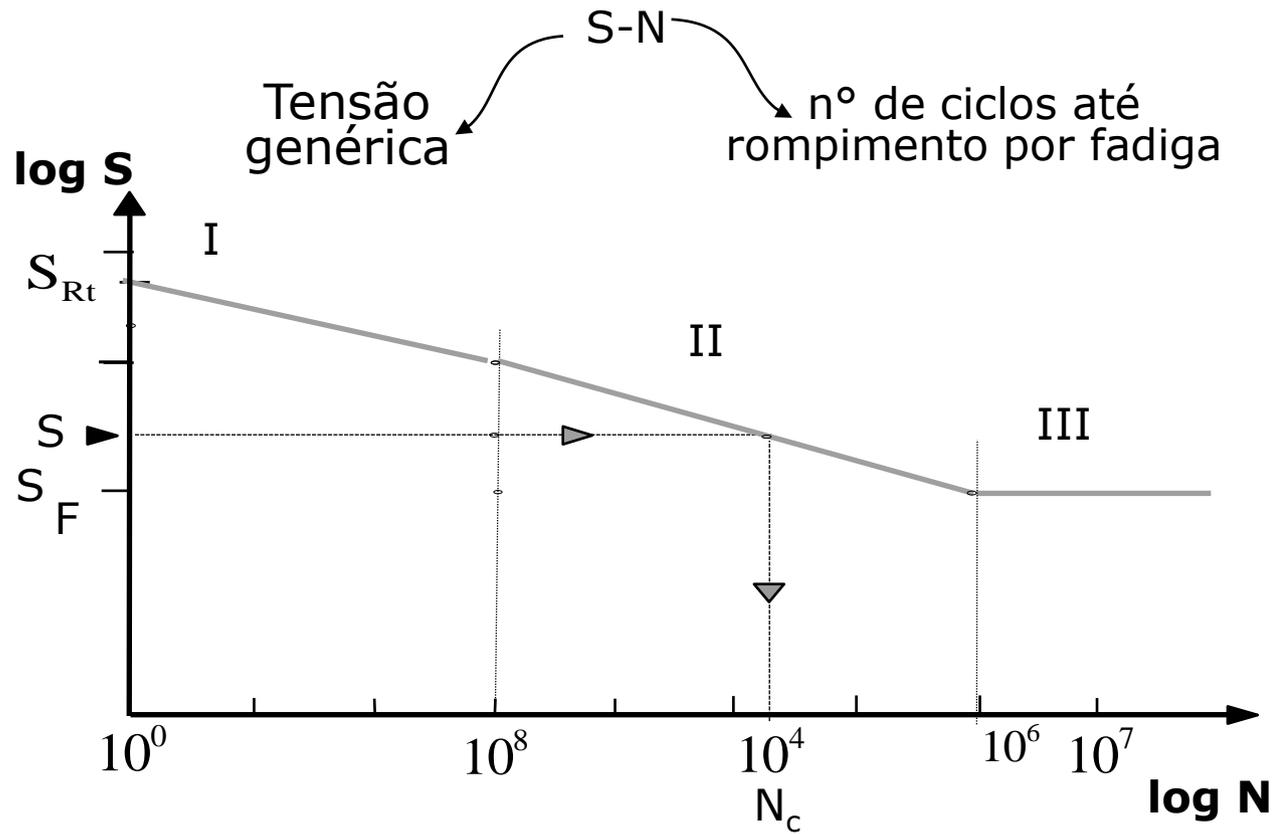
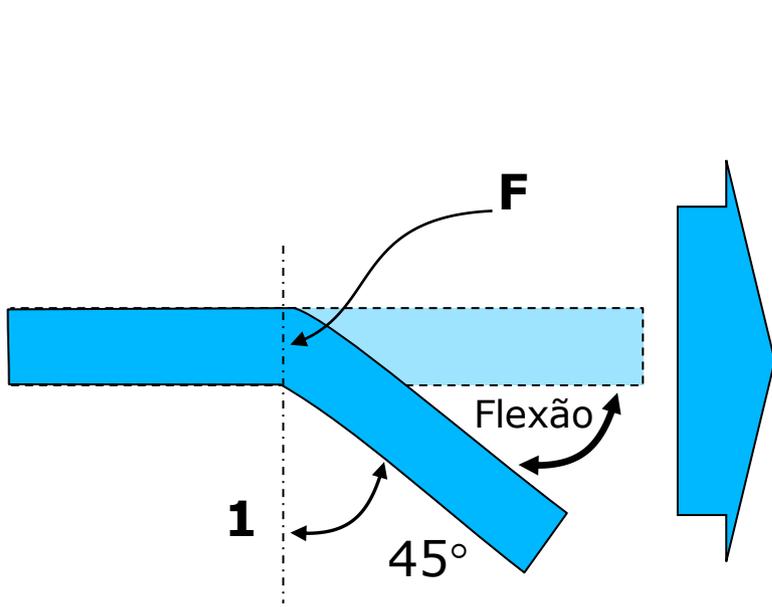
► Problema 2





Curva de Wohler ou diagrama S-N

► Problema 3





Curva de Wohler ou diagrama S-N

Onde:

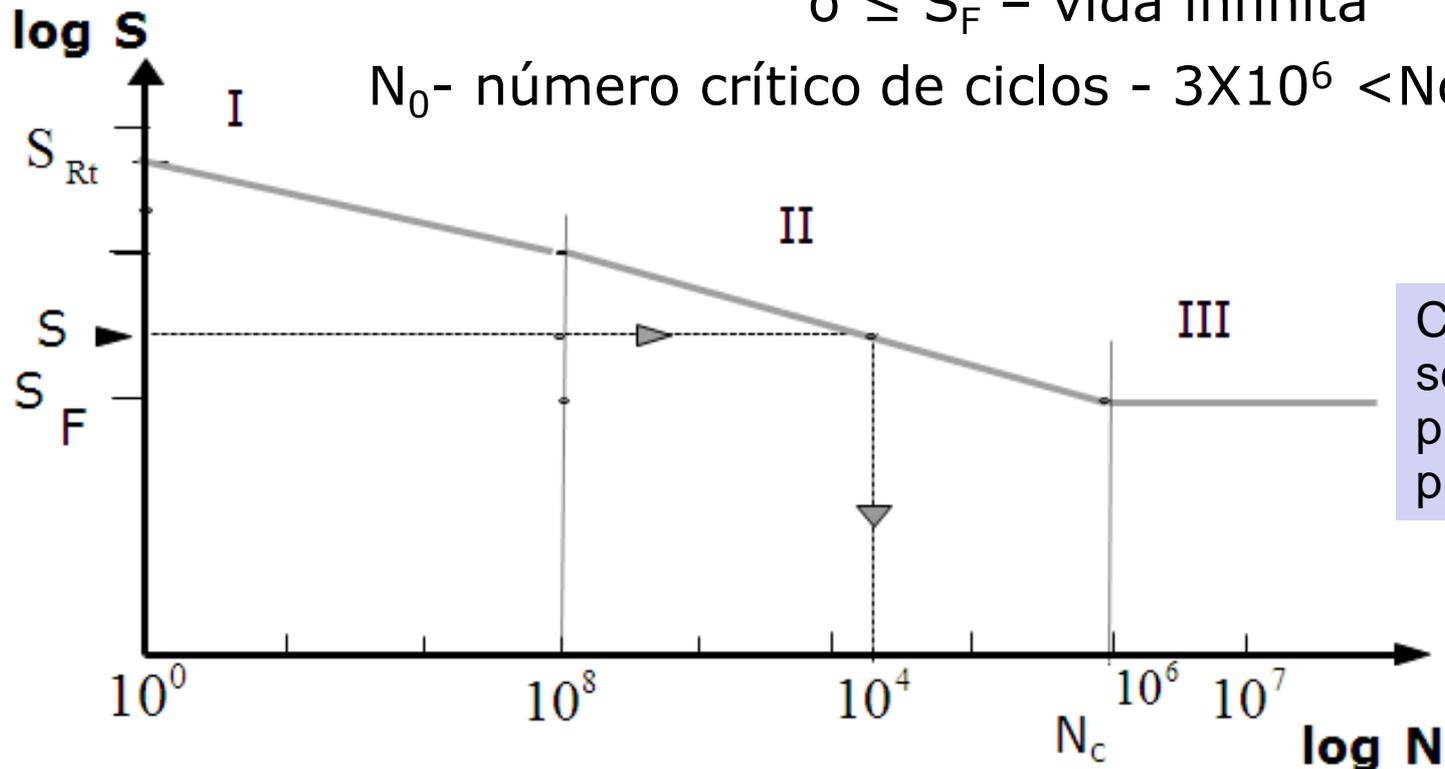
S_{Rt} - tensão ruptura estática

S_F - tensão limite de resistência à fadiga

$$S_F \approx 0,4 \text{ a } 0,6 S_{Rt}$$

$$\sigma \leq S_F - \text{vida infinita}$$

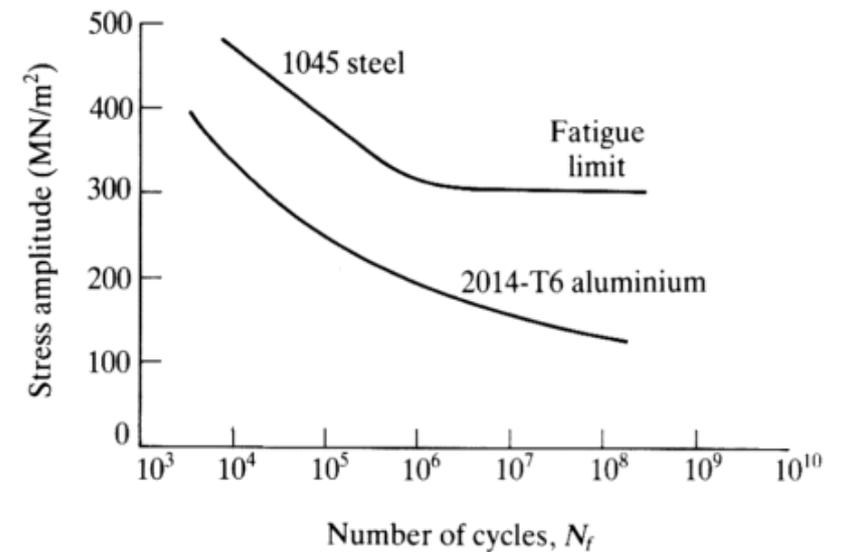
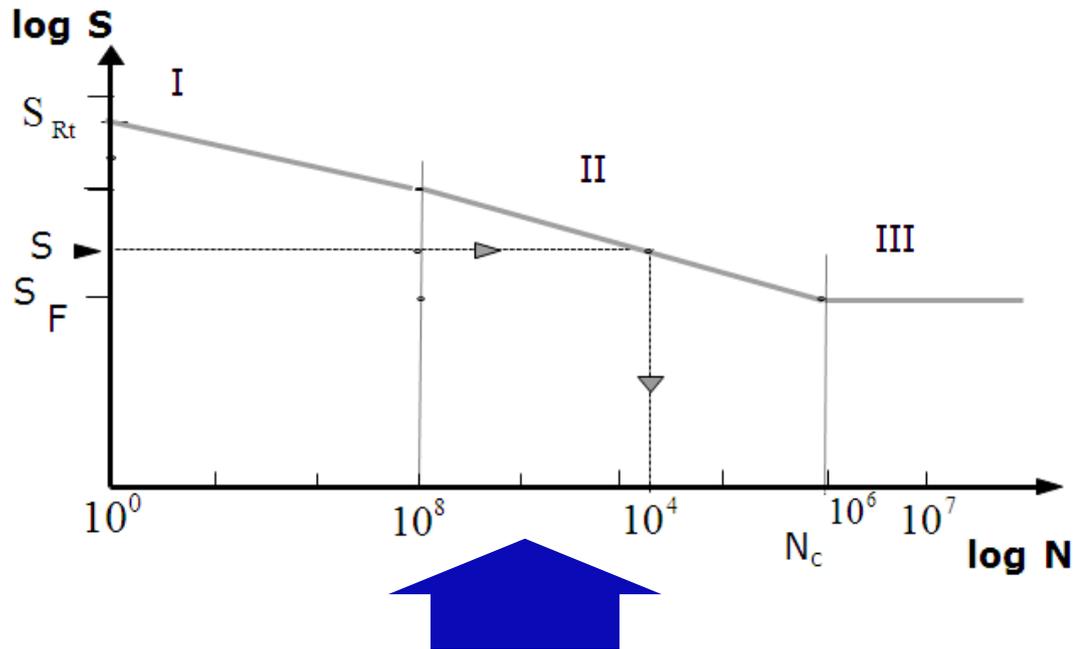
N_0 - número crítico de ciclos - $3 \times 10^6 < N_c < 1 \times 10^7$



Curva de Wohler pode ser obtida com corpo de prova padrão ou com a própria peça



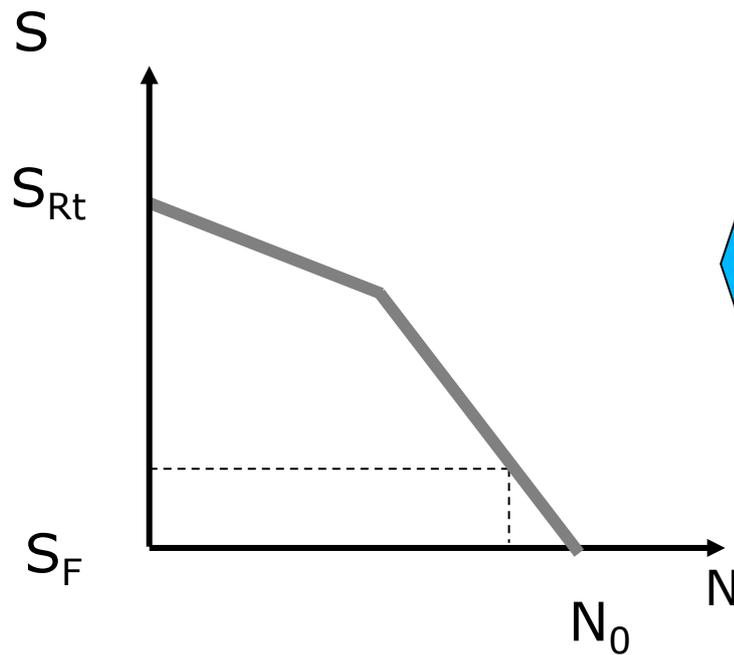
Curva de Wohler ou diagrama S-N



Esta curva vale para Aços e suas ligas, Alumínio e suas ligas, Cobre e suas ligas, Magnésio e suas ligas



Curva de Wohler ou diagrama S-N



Esta curva vale para Polímeros

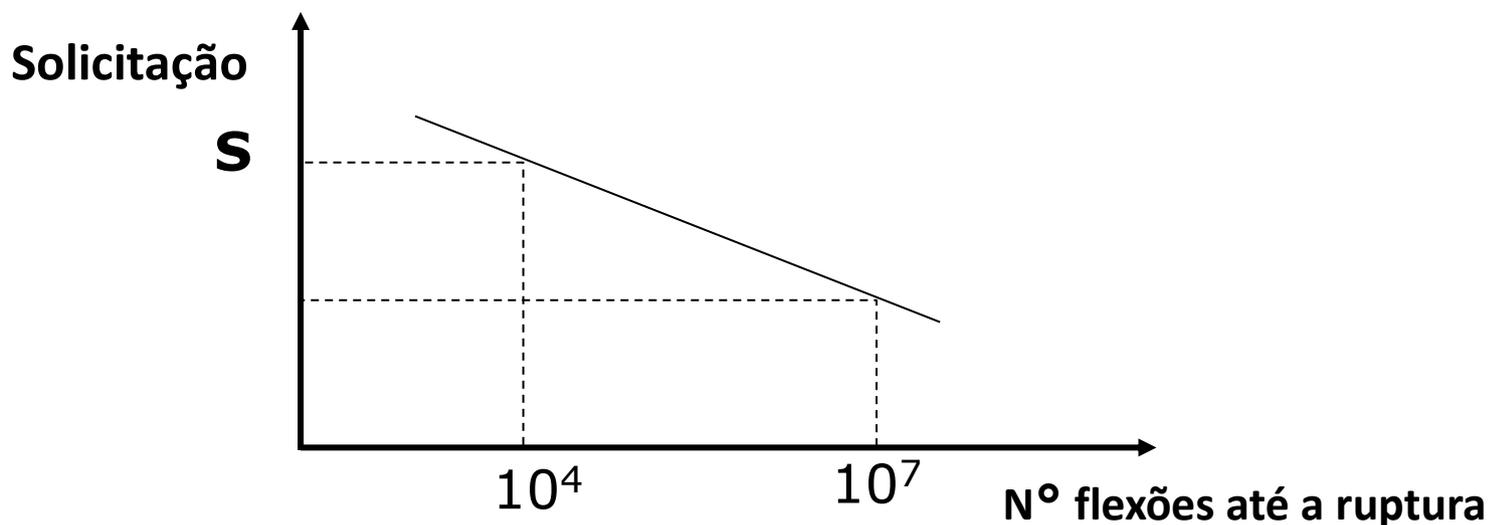
► NÃO HÁ VIDA INFINTA



Curva de Wohler ou diagrama S-N

Exemplo: um eixo rotacionando a 1.000 rpm, equivalente a 60.000 ciclos por hora (6×10^7).

- ▶ Para um Número crítico de ciclos – N_c - equivalente a 1×10^7 temos uma vida de 166,7 hora
- ▶ Se operar com tensão S , ele romperá em 10^4 ciclos (considerar diagrama), então a vida será de 10 minutos





Curva de Wohler ou diagrama S-N

- ▶ Observações

$N < 10^3$ - fadiga a baixa ciclagem

$N < N_c$ - vida finita

$N > N_c$ - vida infinita

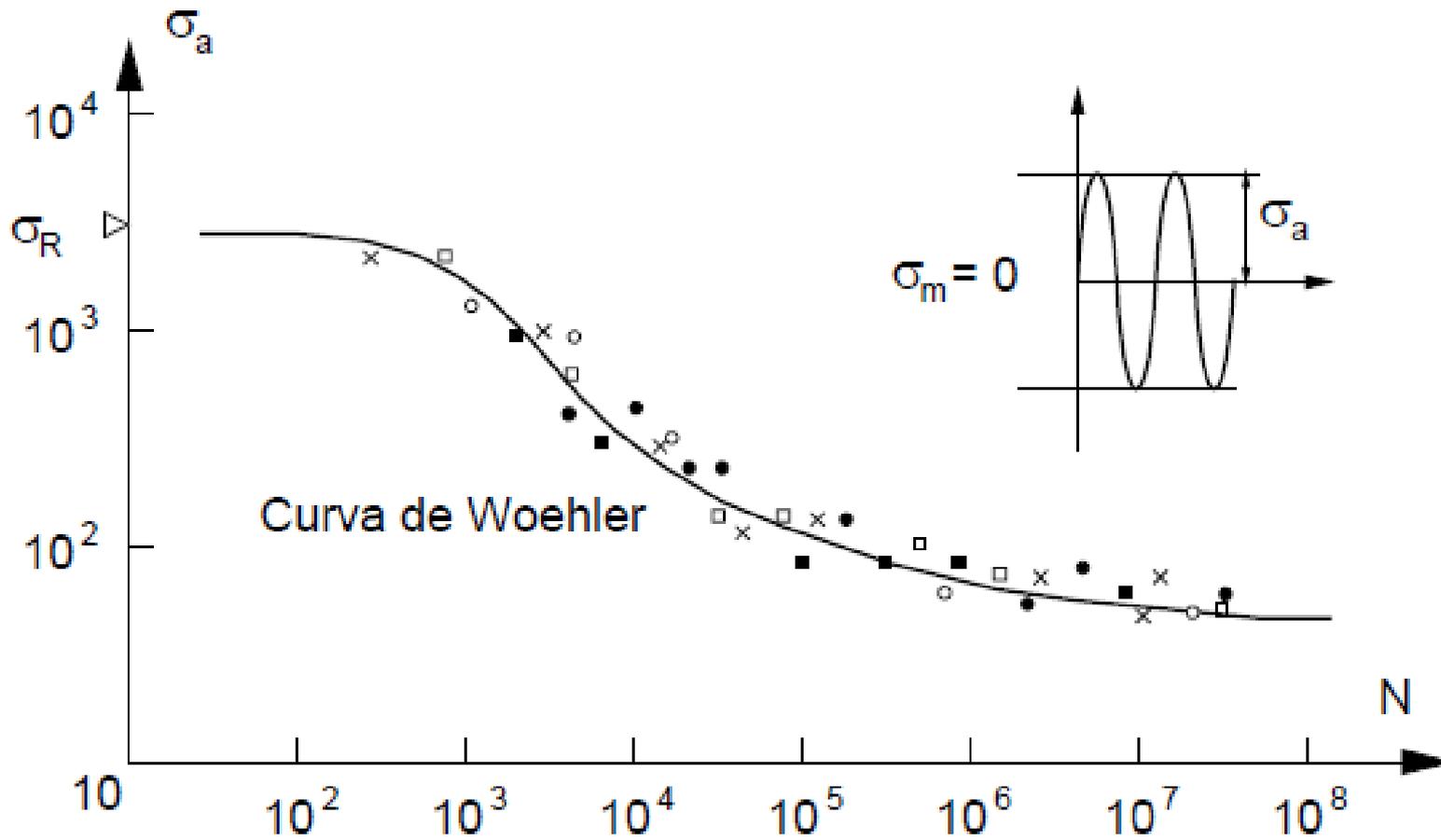
- ▶ Elementos de máquina-

$10^3 < N < N_c$ - peças de engenharia mecânica com vida curta
(descartáveis , obsolência calculada , baixa frequência de uso , etc.).

$N > N_c$ - peças mecânicas em geral



Curva de Wohler ou diagrama S-N





Vídeos recomendados

- ▶ Efeito do concentrador de tensão – placa com furo

<https://www.youtube.com/watch?v=vnpq5zzOS48>

- ▶ Efeito do concentrador de tensão com carregamento cíclico – placa com furo

<https://www.youtube.com/watch?v=c3yM5fT5Ztc>

- ▶ Simulação com carregamento cíclico – eixo engastado

<https://www.youtube.com/watch?v=ejYk58DHoMU>

- ▶ Simulação com carregamento cíclico – componente complexo

<https://www.youtube.com/watch?v=LEHfQsu1I2Y>



Fim da Aula 13