

APOSTILA
do Prof. Eduardo

Projeto de Máquinas

Análise de falhas e cálculo de esforços

Prof. Eduardo Furlan
2023



Falhas

- Cálculos em estudos de projetos de engenharia
 - Estratificar as partes do conjunto
 - Análise das partes
 - Análise do conjunto
- Análise de diversos sistemas
 - Elétrico
 - Mecânico
 - Hidráulico
- Usar matemática e física

Porque as peças falham?

- Tensões que excedem as resistências das peças/materiais
 - Tração, compressão, cisalhamento
- Tipo de carregamento
 - Estático, dinâmico
- Características ou defeitos no material
 - Trincas, etc.

(continua)

Porque as peças falham?

- Combinação de esforços
- Impacto
- Fadiga
 - Cargas cíclicas flutuantes
 - Combinações de cargas

- O carregamento pode produzir
 - Tensões normais
 - Tensões de cisalhamento
- O modo de falha deve ser estudado em todos os projetos
 - Minimizar a parada do equipamento
 - Garantir a segurança necessária ao usuário
- A maior parte das falhas que ocorrem nas máquinas são decorrentes de cargas que variam no tempo
 - Cargas dinâmicas

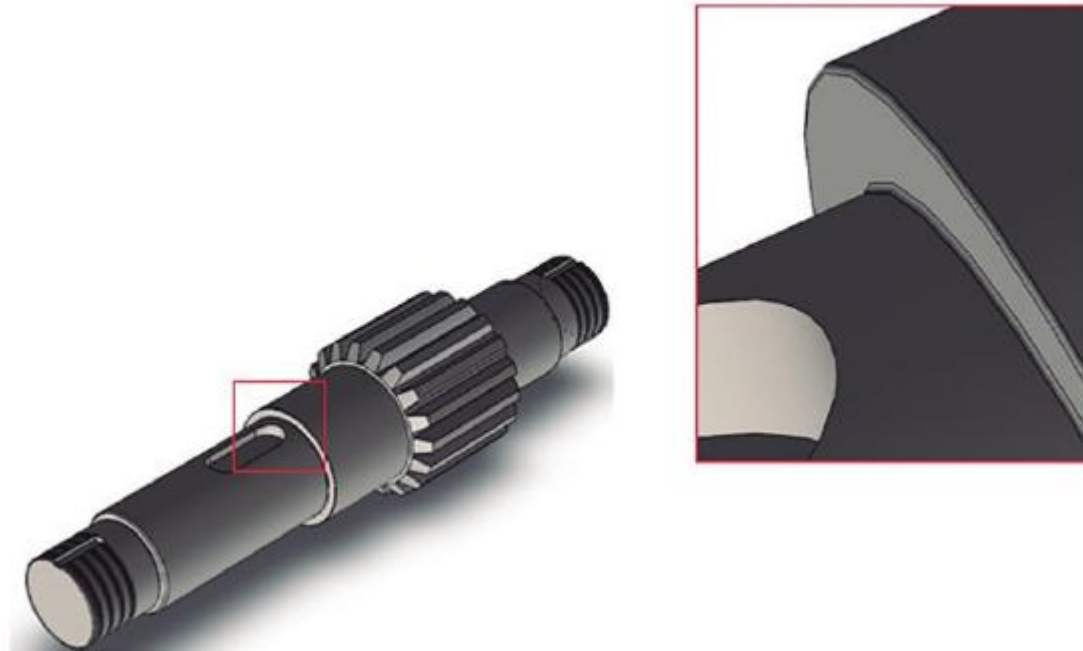
- Falha sob condição dinâmica ou cíclica
 - Fadiga
 - Trincas que muitas vezes são imperceptíveis a olho nu
- Modos de falha são os processos físicos que ocorrem ou que combinam seus efeitos para produzir a falha

Trinca

Trinca

- Concentração de tensão localizada
 - Desenvolve-se no ponto em que a geometria do elemento de máquina possui alguma alteração em sua superfície
 - Saliência
 - Canal
 - Rebaixo
 - Risco provocado pela operação incorreta em uma montagem
- Quando colocado em operação sob carga cíclica
 - Trincas aumentam devido
 - Concentração de tensão localizada
 - Função do tempo

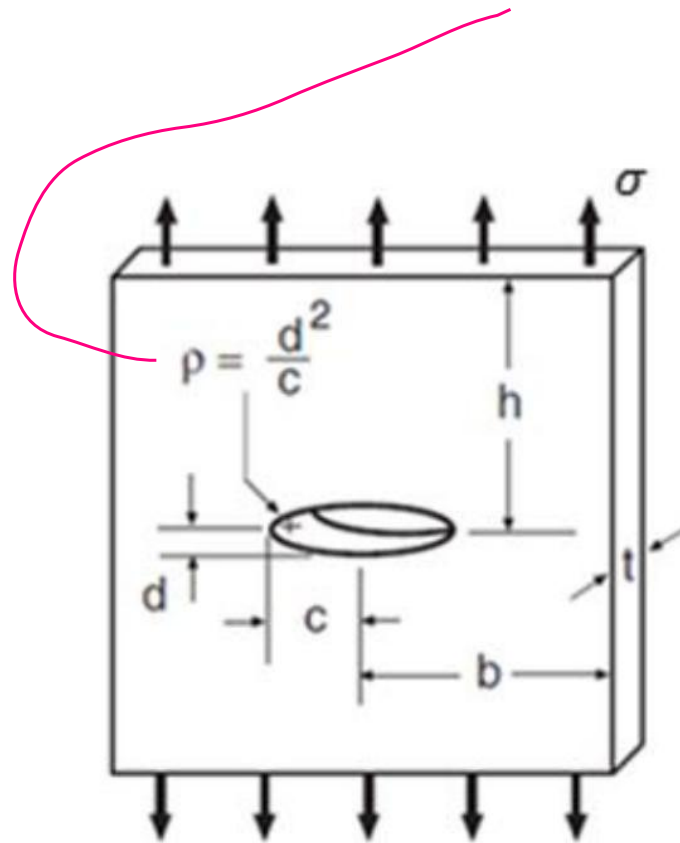
Figura 2.2 | Eixo pinhão com engrenagem



- Pequeno raio na mudança de geometria
 - Minimiza a atuação da tensão localizada da seção

- Falha repentina de um elemento de máquina, sem que ocorra um modo de falha
 - Nível de tensão excede o valor crítico para um número especificado de ciclos
- 3 estágios da falha por fadiga
 - Início da trinca
 - Propagação da trinca
 - Ruptura repentina devido ao crescimento instável da trinca

- Falha por fadiga pode ser diferenciada visualmente de uma falha estática
- Aparecimento de duas regiões na peça com falha
 - Início da trinca
 - Aumento da trinca
 - Determinado pelo raio de ponta desta trinca, visto na falha estática de um material frágil, como o ferro fundido



- Materiais dúcteis
 - Falha especificada pelo início do escoamento
- Materiais frágeis
 - Falha especificada pela fratura
- O limite de fadiga existe somente na ausência da corrosão

Determinação das cargas

Determinação das cargas

- Definição estatística das cargas aplicadas
 - Utilização de procedimentos experimentais
- Estimativas de cargas atuantes nos componentes
 - Registros de falhas em serviço
 - Análises de resistência
- A determinação das cargas apropriadas é geralmente uma etapa inicial difícil do projeto de uma máquina

Vida X Número de ciclos

- Aço
 - Vida infinita
 - Desde que não ultrapasse o valor crítico de tensão
- Alumínio
 - Vida limitada
 - Falhará em algum ponto

Figura 2.3 | Tipos de tensão atuantes em função do tempo

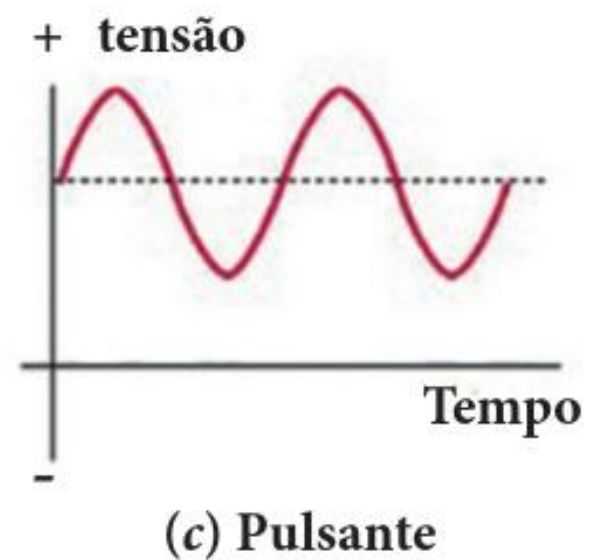
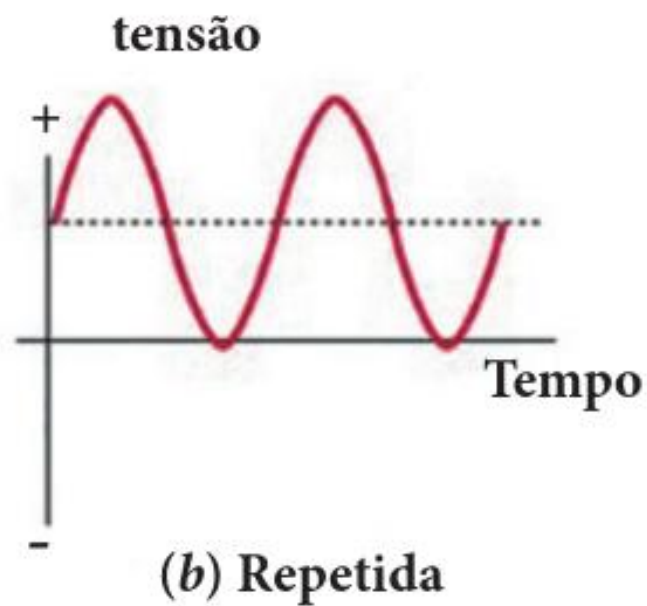
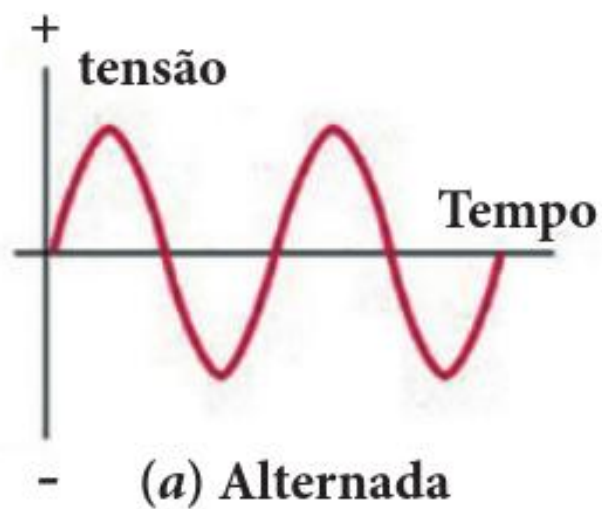


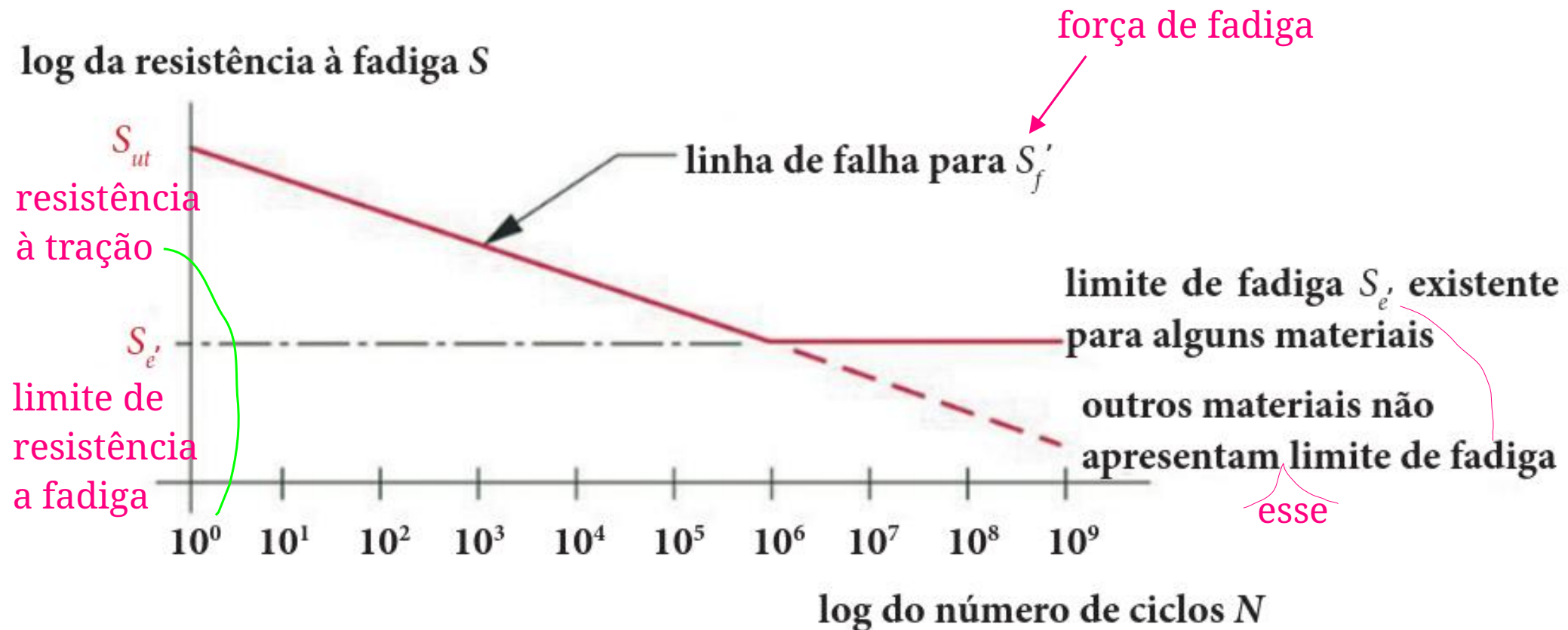
Diagrama S-N, ou Curva de Wöhler

- Engenheiro alemão August Wöhler
- Forma padrão para caracterizar o comportamento dos materiais submetidos a solicitações alternadas
- Além dele, existirem também outras formas para determinar a vida útil de um componente específico
- Materiais ferrosos (aços carbono, aços-liga e ferros forjados) testados usando a máquina de ensaios rotativos
- Relação entre a resistência à tração (S_{ut}) e o limite de resistência (S_e)

Curva de Wöhler

Diagrama S-N ou Curva de Wöhler

resistência à fadiga versus vida esperada



Predição da vida útil


3 modelos de falhas por fadiga:

1) Regime de fadiga

- Baseia-se no modelo de tensão-número de ciclos (S-N)
- Ciclos de tensão ou de deformação para o componente
 - Fadiga de baixo ciclo (FBC)
 - até $N = 10^2$ ciclos de tensão/deformação em função do material
 - Fadiga de alto ciclo (FAC)
 - $N = 10^3$ ciclos

2) Deformação -- número de ciclos

- Esclarece os danos cumulativos
 - Devido às modificações cíclicas na carga ao longo da vida
 - Que podem introduzir tensões residuais favoráveis ou desfavoráveis na região de falha
- As combinações de cargas de fadiga e temperatura são modeladas com maior segurança nesse caso
 - Porque os efeitos de fluência podem ser incluídos na formulação matemática
- Aplicado quando tensões cíclicas elevadas causam escoamento local
 - Regimes de fadiga de baixo-ciclo
 - Problemas de vida finita



Deformar lentamente quando
sujeito a temperatura e
tensões bem abaixo do ponto
de escoamento considerado
seguro no ensaio de tração

3) Modelo da mecânica da fratura linear-elástica (MFLE)

- Usa a análise da fratura
 - Determinar a melhor forma de identificação do ponto de tensão
- Utilizado para determinar o tempo de vida de um determinado componente
 - Principalmente para regimes de baixo ciclo
 - Em que as tensões cíclicas são conhecidas

Relação empírica

- Ligas ferrosas

$$S_e = 0,504S_{ut} \text{ para } S_{ut} \leq 1400MPa$$

$$S_e = 700MPa \text{ para } S_{ut} > 1400MPa$$

Sendo:

S_e = Limite de resistência a fadiga

S_{ut} = Limite de resistência a tração

SI: Pascal (Pa) ou Newton por m² (N/m²)

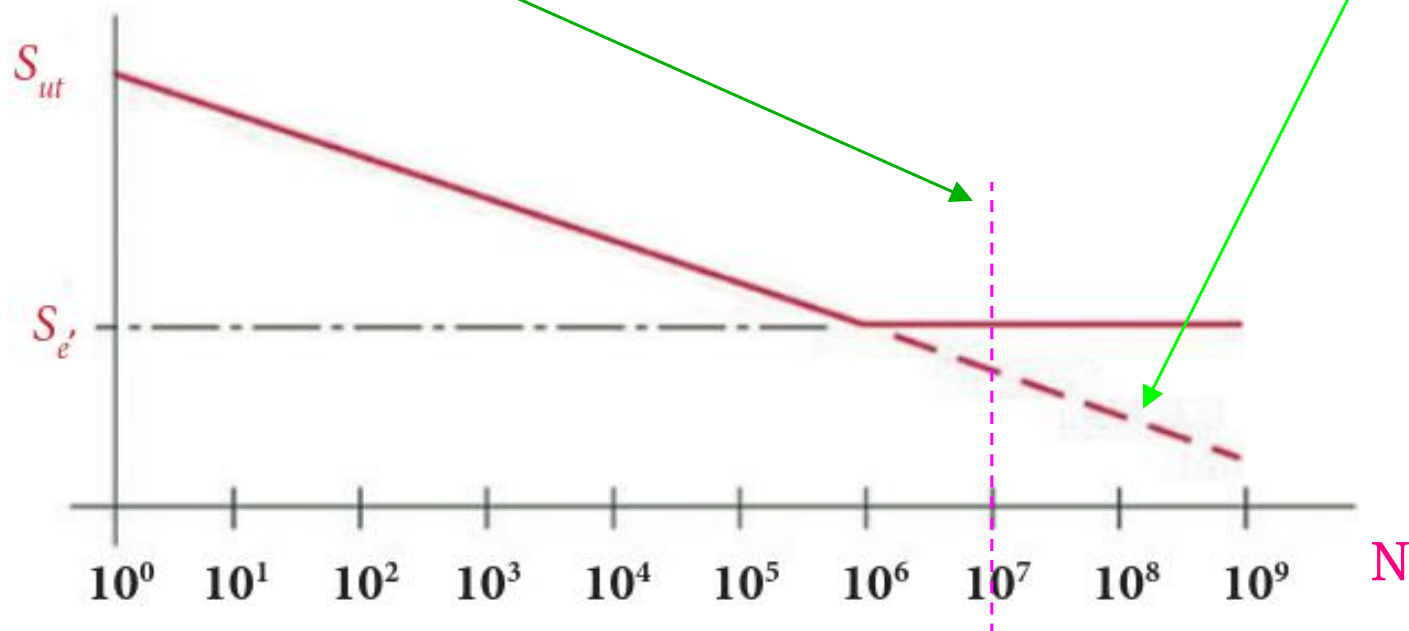
- Alumínio, magnésio, cobre, ligas de níquel, alguns aços inoxidáveis e aços-liga e de alto carbono

- Exibem curvas S-N que continuam o seu decaimento com o aumento de N

- A inclinação pode tornar-se menor além de aproximadamente 10^7 ciclos

limite de tração

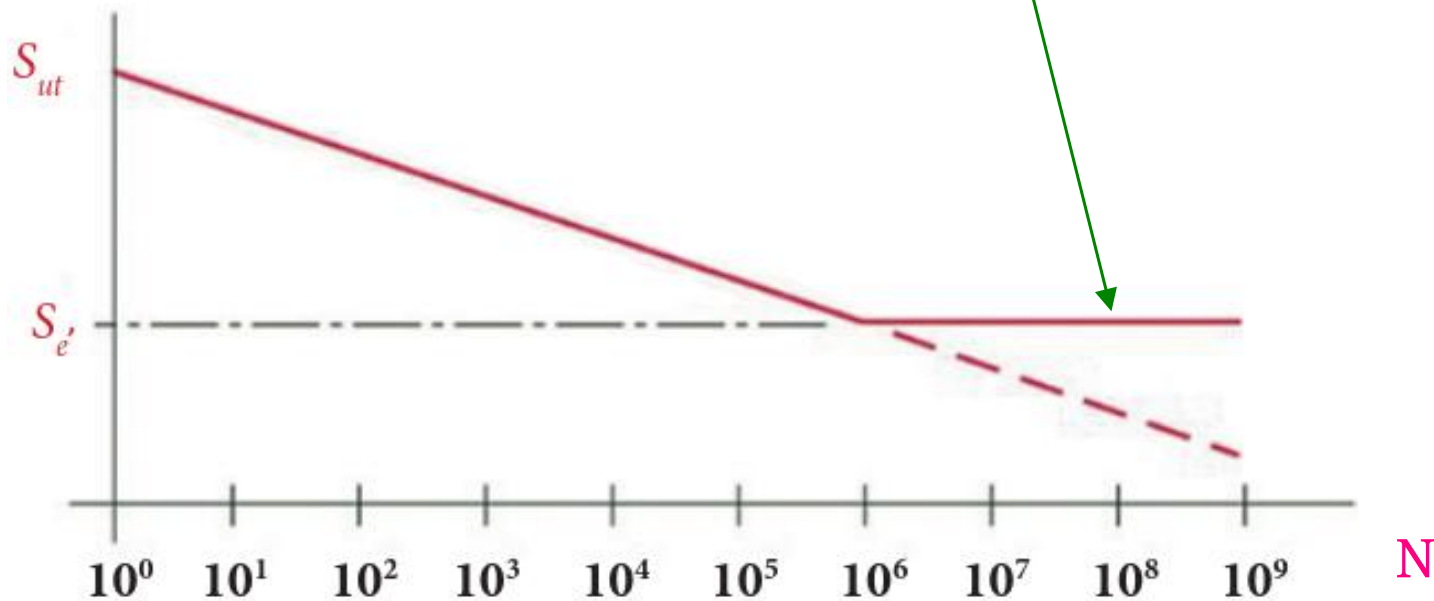
limite de fadiga



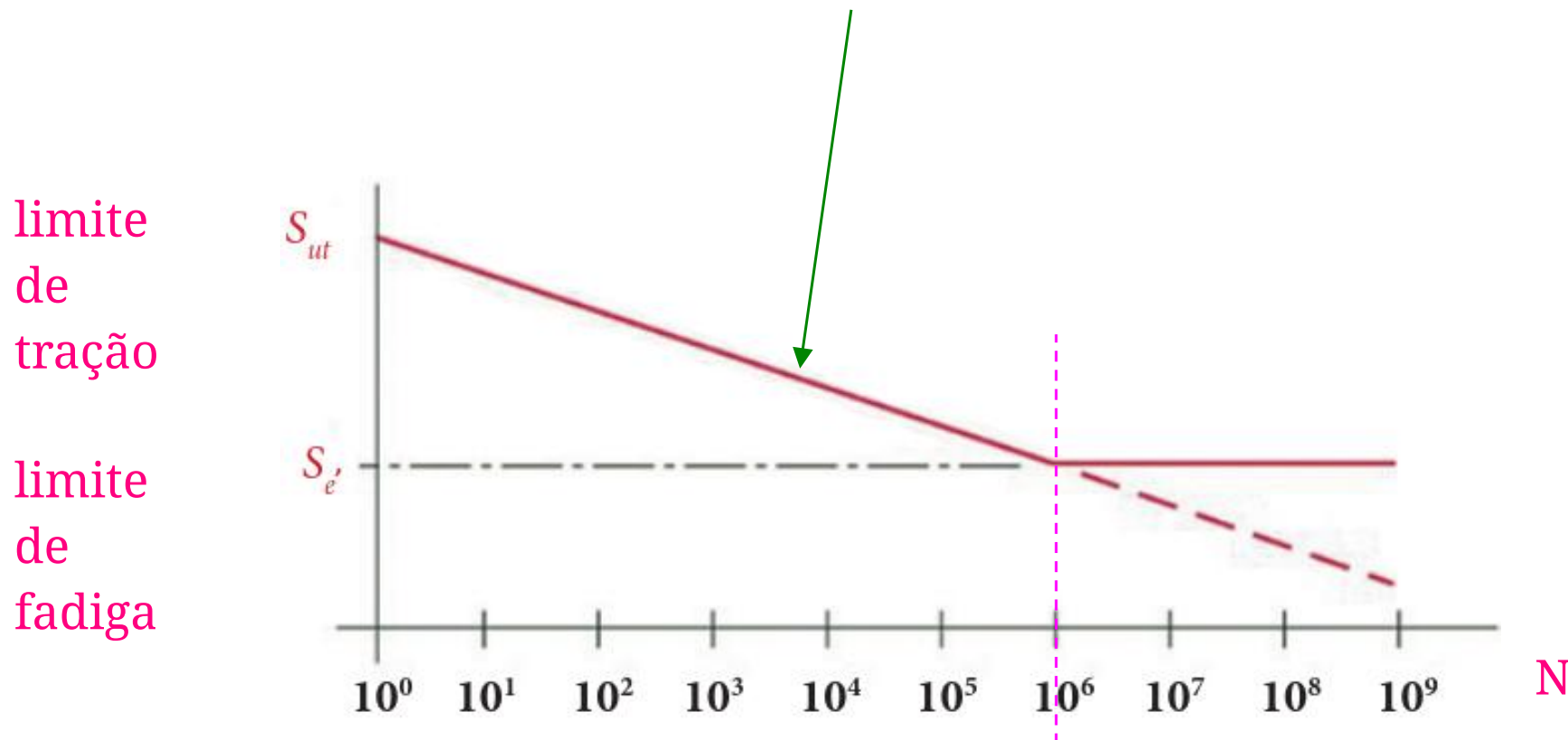
- Muitos aços-liga e de baixo carbono, alguns aços inoxidáveis, ferros, ligas de molibdênio, ligas de titânio e alguns polímeros

limite
de
tração

limite
de
fadiga



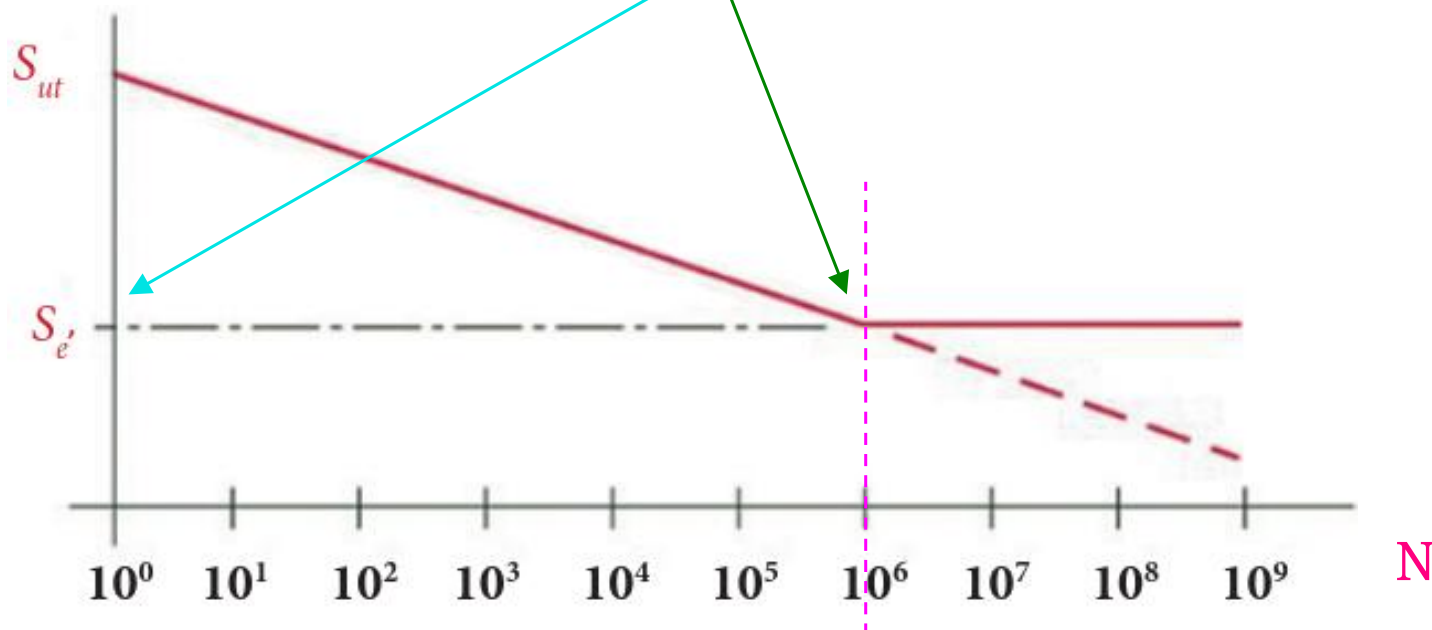
- Para aplicações que requerem um tempo de operação inferior a 10^6 ciclos, pode-se definir uma resistência à fadiga S_f para qualquer N dos dados em questão



- Encontra-se uma inflexão e define-se o limite de fadiga S_e para o material
- Considerando que o nível de tensão deve ser abaixo do qual não ocorrem mais falhas por fadiga, podendo-se continuar os ciclos de tensão ilimitadamente

limite de
tração

limite de
fadiga



Equação da reta

força de fadiga

$$S_f = aN^b$$

coeficientes

$$a = \frac{(0,9 \cdot S_{ut})^2}{S_e}$$

[unidade de tensão]

$$b = -\frac{1}{3} \log \frac{0,9 S_{ut}}{S_e}$$

[adimensional]

força de fadiga

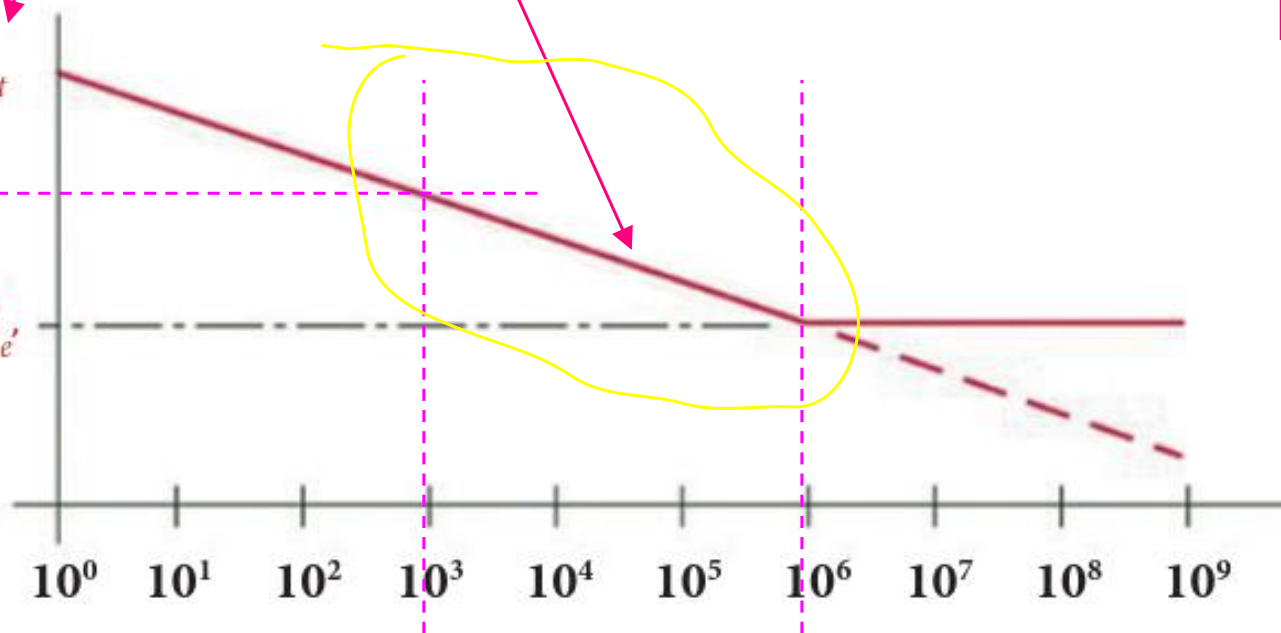
limite de tração

S_{ut}

$$S_f = 0,9 \cdot S_{ut}$$

$$S_f = S_e$$

limite de fadiga



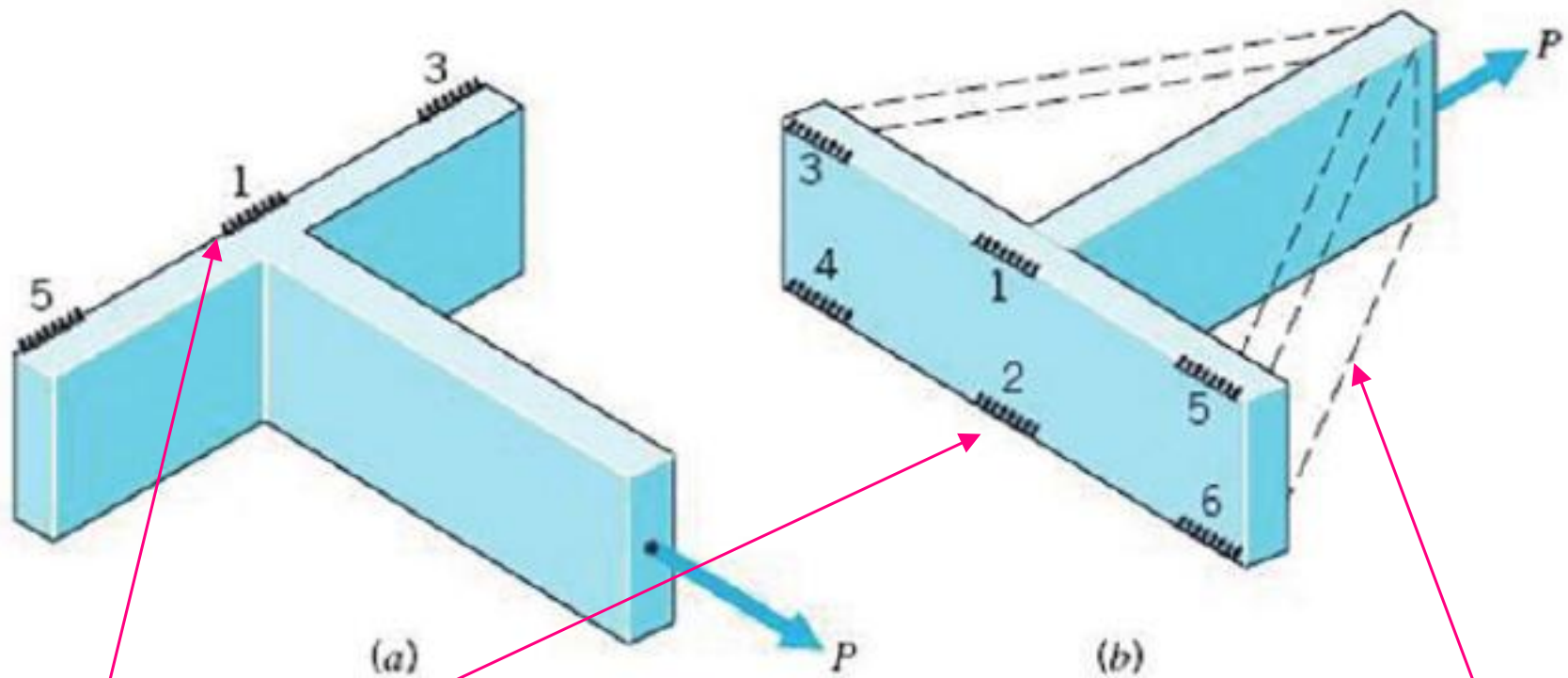
N

Cálculo de esforços

Cálculo de esforços para cargas estáticas

31

- Cargas fundamentais (cargas que causam deformações)
 - Carga axial
 - Carga direta de cisalhamento
 - Torção
 - Flexão
- 2 tipos de estresse
 - Normal (quando a carga é axial)
 - Cisalhamento



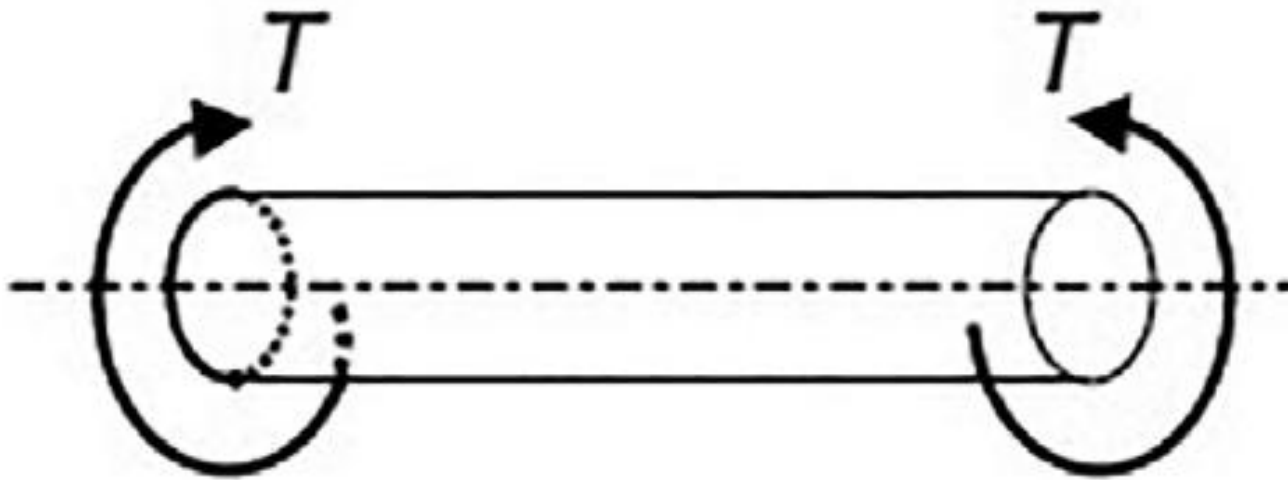
Soldas 1 e 2 suportam praticamente toda a carga

Instalação de 2 placas laterais para uniformizar a distribuição de carga entre as soldas

Carga em eixos de transmissão de rotação

33

- Geralmente de 2 tipos
 - Torção devido ao torque transmitido
 - Flexão devido às cargas transversais em engrenagens, polias e catracas
- Torque transmitido pode estar associado com
 - Forças nos dentes de engrenagens
 - Catracas fixadas aos eixos
- Cargas torcionais e flexionais fixas ou variáveis, com o tempo, também podem ocorrer em qualquer combinação no mesmo eixo



- Eixo sob torção que sofre torque T em sentidos opostos
- Carga de torção ao longo do eixo, resultando em uma distribuição de tensão de cisalhamento τ (tau)

$$\tau = \frac{Tr}{J}$$

torque $\rightarrow T$

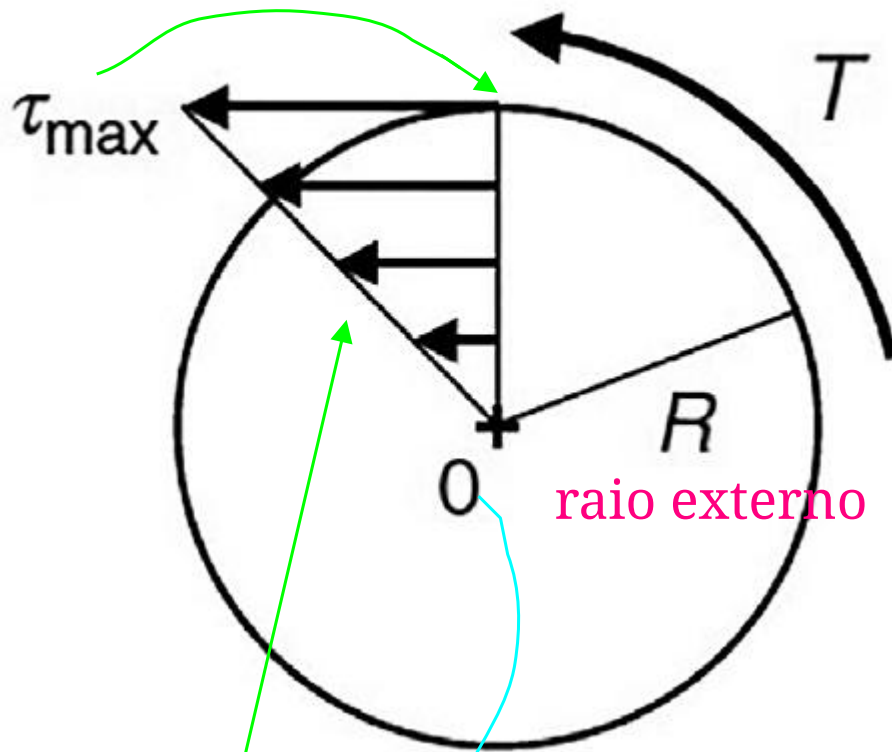
tensão de cisalhamento (tau) $\rightarrow \tau$

momento polar de inércia (iota) $\rightarrow J$

distância do centro do eixo $\rightarrow r$

$0 \leq r \leq R$

raio externo $\rightarrow R$



$$\tau = \frac{Tr}{J} \quad 0 \leq r \leq R$$

(mesma equação
do slide anterior)

- A distribuição dada pela equação é linear
- τ_{\max} ocorre na superfície do eixo ($r=R$)
- $\tau = 0$ no centro do eixo ($r=0$)

- A equação é válida apenas para seções transversais circulares
- J (iota) momento polar de inércia, é utilizado para eixo de seção circular sólido, de raio R

$$J = \frac{1}{2} \pi R^4$$

- Uma vez determinadas as cargas aplicadas, as equações básicas de equilíbrio permitem que os esforços atuantes em outros pontos de um componente sejam determinados
- Para um corpo sem aceleração

$$\sum F = 0$$

forças

$$\sum M = 0$$

momentos

- As equações se aplicam relativamente a cada um dos três eixos X, Y, e Z

Classe de solicitações

Classe de solicitações

- Classe 1
 - Sistema imóvel com solicitações constantes
 - Ex.: estrutura da base de uma prensa de bancada usada em uma oficina mecânica
- Classe 2
 - Sistemas imóveis, com solicitações variáveis no tempo
 - Ex: uma ponte que, embora por sua essência seja imóvel, é submetida a solicitações variáveis quando os automóveis a transpassam ou ainda em função de correntes de vento que se chocam com a sua estrutura

- Classe 3
 - Sistemas móveis com solicitações constantes
 - Ex.: cortador de grama com lâminas rotativas
- Para as Classes 2 e 3, deve ser utilizada a análise dinâmica na determinação das solicitações
- Classe 4
 - Sistema móvel suficientemente veloz submetido a solicitações variáveis no tempo
 - Classe de grande parte das máquinas, principalmente as que são movidas por motor
 - É usada análise dinâmica das solicitações

- Pode-se realizar a análise dinâmica baseada nas Leis de Newton
- A segunda Lei de Newton pode ser escrita para corpos rígidos de duas maneiras

$$\overset{\text{Força}}{\sum F} = \overset{\text{massa}}{m} \cdot \overset{\text{aceleração}}{a}$$

$$\sum M_G = H_G$$

Momento em relação ao centro de gravidade

Derivada em relação ao tempo da quantidade de movimento angular ou ao centro de gravidade

- Em um sistema tridimensional de corpos rígidos conectados, a equação vetorial pode apresentar três equações escalares com os componentes ortogonais e de acordo com os eixos x, y, z e **origem no CG do corpo**

$$\sum F_x = ma_x$$

$$\sum F_y = ma_y$$

$$\sum F_z = ma_z$$

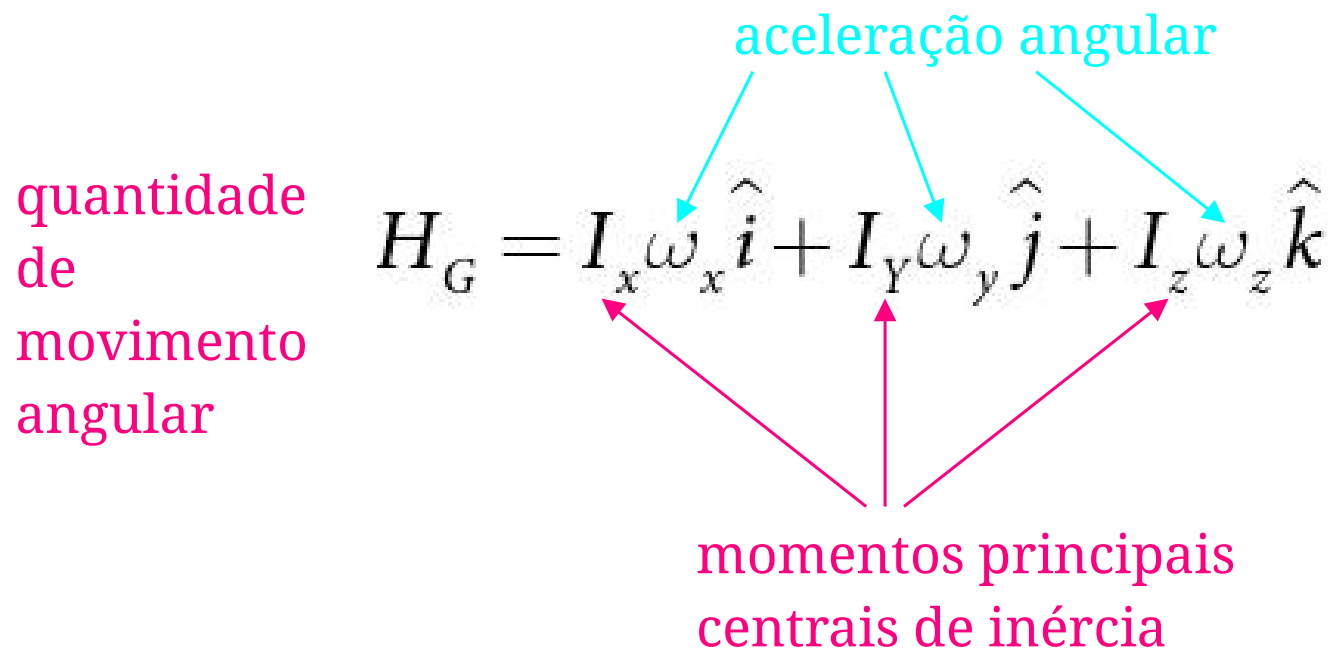
- Em uma situação em que os eixos x , y , z escolhidos coincidam com os eixos principais de inércia do corpo (corpos simétricos), temos que a quantidade de movimento angular do corpo é definida pela equação

quantidade de movimento angular

$$H_G = I_x \omega_x \hat{i} + I_y \omega_y \hat{j} + I_z \omega_z \hat{k}$$

aceleração angular

momentos principais centrais de inércia



- Das equações anteriores são geradas as 3 equações escalares de Euler

momentos em
relação aos eixos

componentes de
aceleração angular

$$\sum M_x = I_x \alpha_x - (I_y - I_z) \omega_y \omega_z$$

$$\sum M_y = I_y \alpha_y - (I_z - I_x) \omega_z \omega_x$$

$$\sum M_z = I_z \alpha_z - (I_x - I_y) \omega_x \omega_y$$

momentos principais
centrais de inércia

aceleração angular

- Muitos dos sistemas tridimensionais são analisados na forma bidimensional
- Isso ocorre quando os seus movimentos acontecerem
 - Em apenas um plano
 - Ou no caso de planos paralelos

$$\sum M_z = I_z \cdot \alpha_z$$

$$\sum F_x = m \cdot a_x$$

$$\sum T_y = m \cdot a_y$$

Referências

BUDYNAS, R. G. Elementos De Maquinas De Shigley. 8ª edição. [S. l.]: AMGH, 2011.

COLLISN, J. A.; BUSBY, H. R.; STAAB, G. H. Projeto Mecânico de Elementos de Máquinas: uma Perspectiva de Prevenção da Falha. 2ª edição. [S. l.]: LTC, 2019.

LOBO, Y. R. de O.; JÚNIOR, I. E. de O.; ESTAMBASSE, E. C.; SHIGUEMOTO, A. C. G. Projeto de máquinas. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2019.

NORTON, R. L.; BOOKMAN, E.; STAVROPOULOS, K. D.; AGUIAR, J. B. de; AGUIAR, J. M. de; MACHNIEVSCZ, R.; CASTRO, J. F. de. Projeto de Máquinas: Uma Abordagem Integrada. 4ª edição. [S. l.]: Bookman, 2013.

APOSTILA
do Prof. Eduardo

<https://github.com/efurlanm/teaching/>

Prof. Eduardo Furlan
2023

