

APOSTILA
do Prof. Eduardo

Projeto de Máquinas

Elementos de ligação

Prof. Eduardo Furlan
2023



Acoplamentos

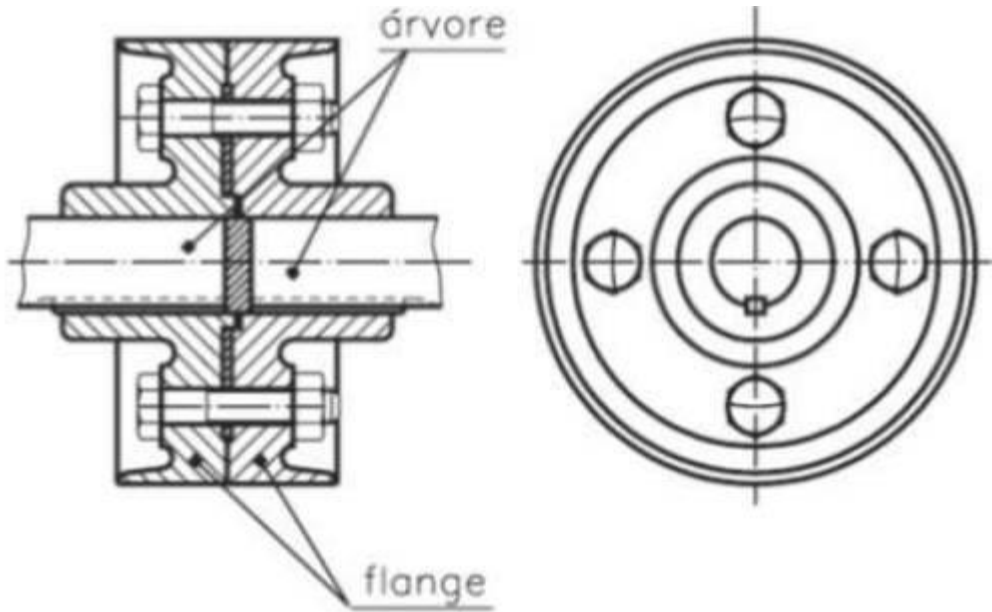
Acoplamentos



Acoplamentos

- Um dos elementos de ligação
- Transmite movimento de rotação entre árvores
- Podem ser classificado como
 - Fixos
 - Elásticos
 - Móveis

Fixo



- Une eixos árvores para que funcionem como se fosse uma única peça
- Não há movimento relativo entre eles
- Podem ser de 3 tipos (slides a seguir)

Fixo - Luva de compressão



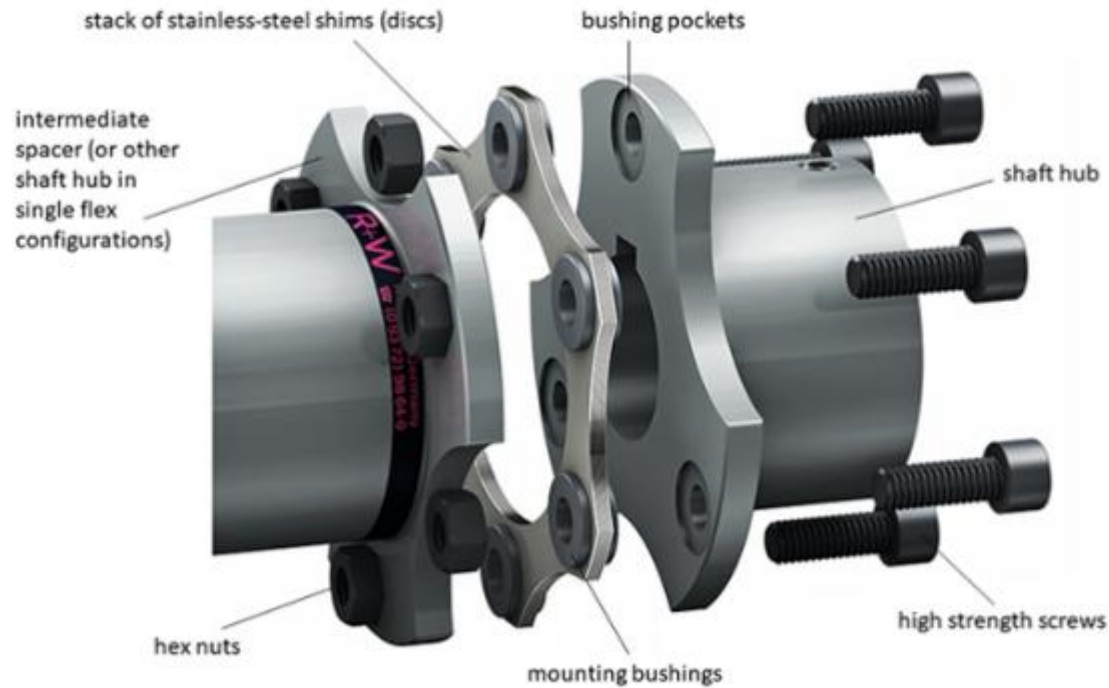
- Facilita a manutenção das máquinas, pois não interferem no posicionamento das árvores
- Montados e removidos sem apresentar problemas de alinhamento

Fixo - Rígido com flanges parafusadas ⁷



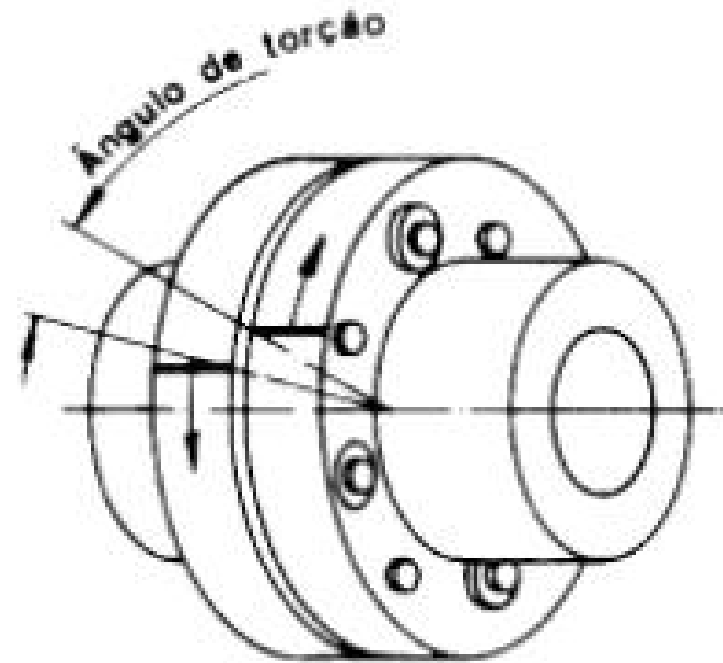
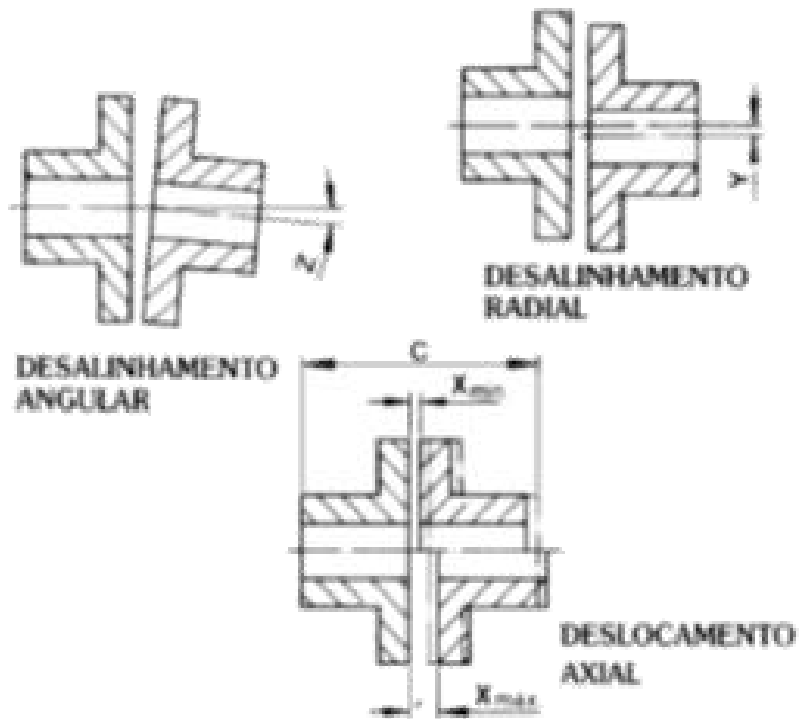
- Transmissão de altas potências
- Em baixa velocidade

Fixo - Disco ou prato



- Transmissão de altas potências

Elástico



Elástico

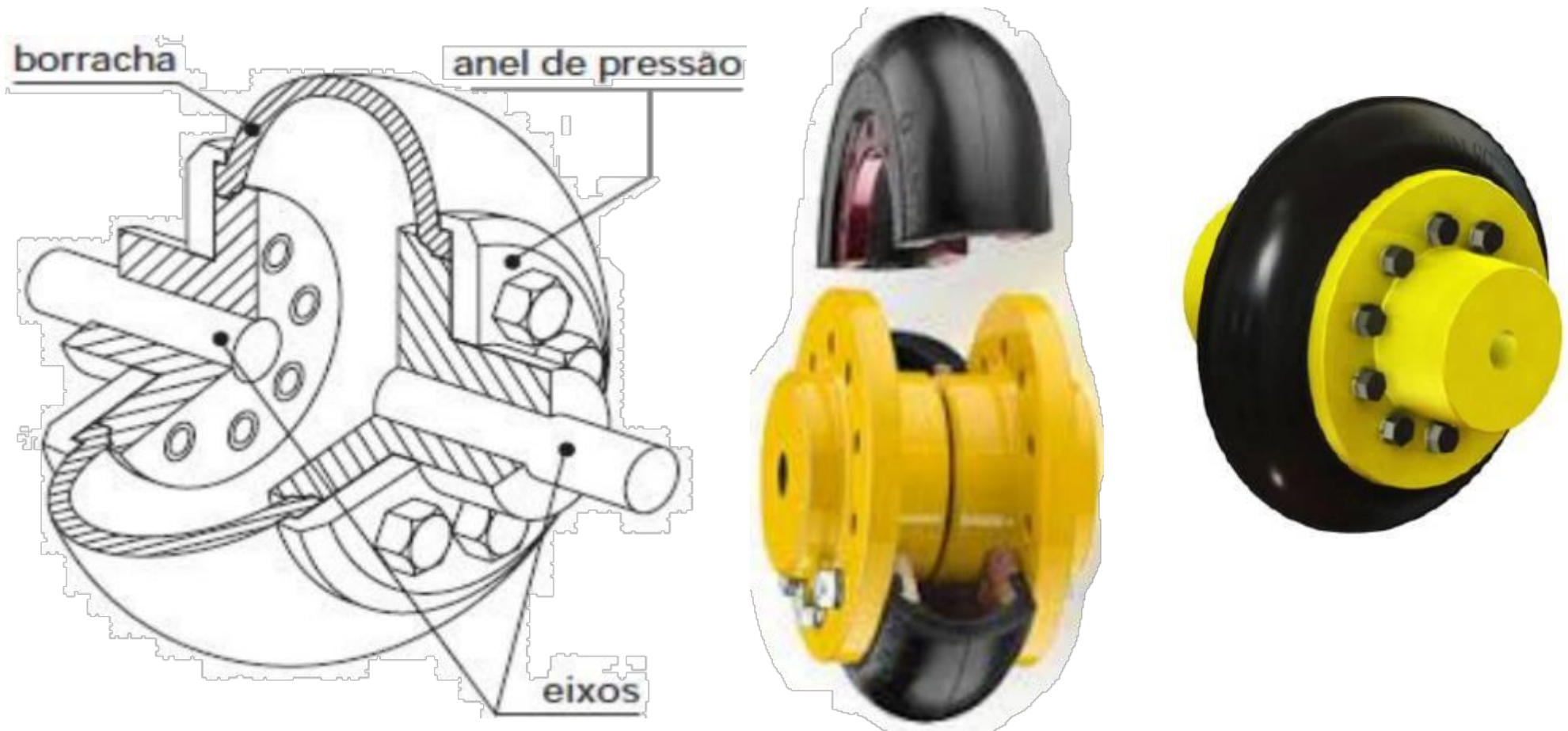
- Tornam a transmissão do movimento mais suave
- Permitem o funcionamento de conjuntos desalinhados entre árvores, de forma
 - Paralela
 - Angular
 - Axial
- São produzidos de forma articulada
 - Permite a compensação de desalinhamentos e deslocamentos

Elástico de pino



- Pinos de aço com mangas de borracha
- Facilidade de desacoplar do eixo quando se precisa remover das máquinas

Elástico Perflex



- Discos de acoplamento unidos perifericamente por uma ligação de borracha, apertada por anéis de pressão
- São utilizados, por exemplo, em bombas d'água

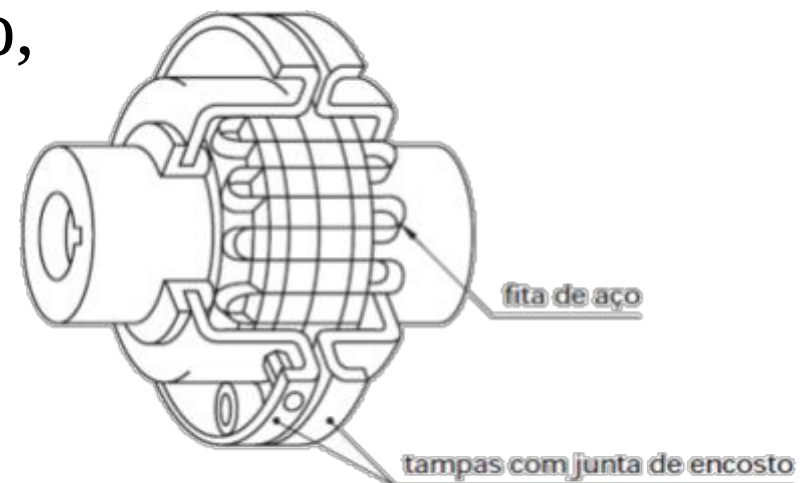
Elástico de garras



- A borracha se encaixa na abertura do contradisco
- Aplicação em campo aberto
- Dispensam lubrificação

Elástico fita de aço

- Dois cubos de flanges ranhurados
- Tampas providas de junta de encosto e de retentor elástico junto do cubo
- O espaço entre os cubos é preenchido de graxa
- Apesar do acoplamento ser elástico, as árvores precisam estar bem alinhadas para não provocar vibrações excessivas



Elástico de dentes arqueados



- Permite até 3 graus de desalinhamento angular

Elástico junta universal homocinética¹⁶

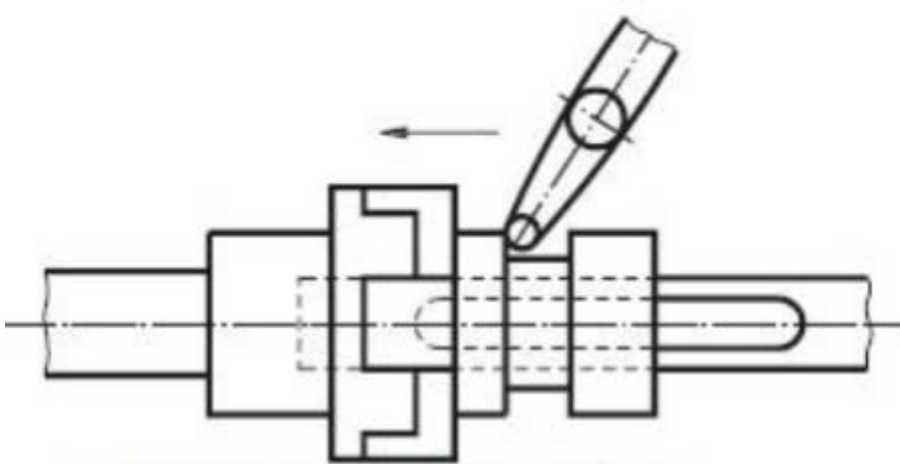
- Esferas de aço que se alojam em calhas



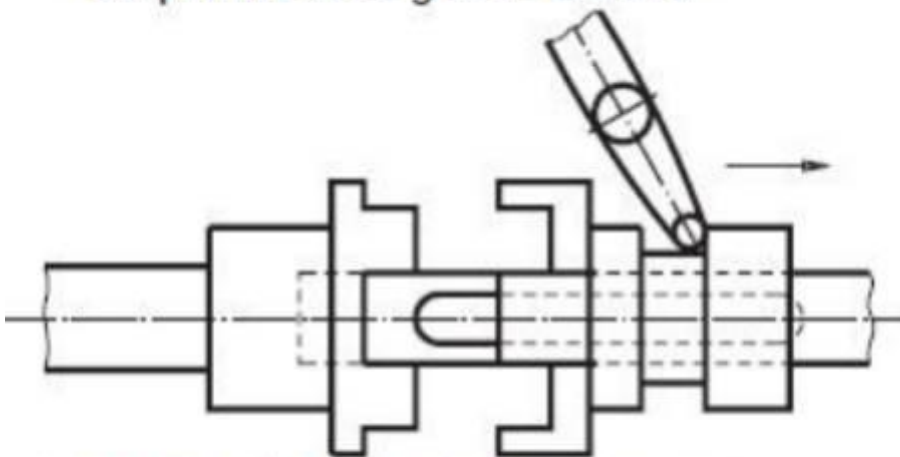
- Transmite movimento entre árvores que precisam sofrer variação angular durante sua operação



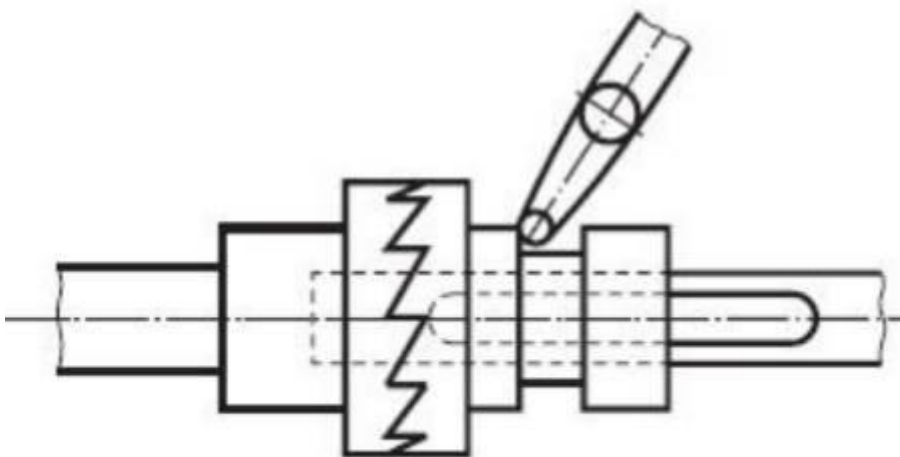
Acoplamento Móvel



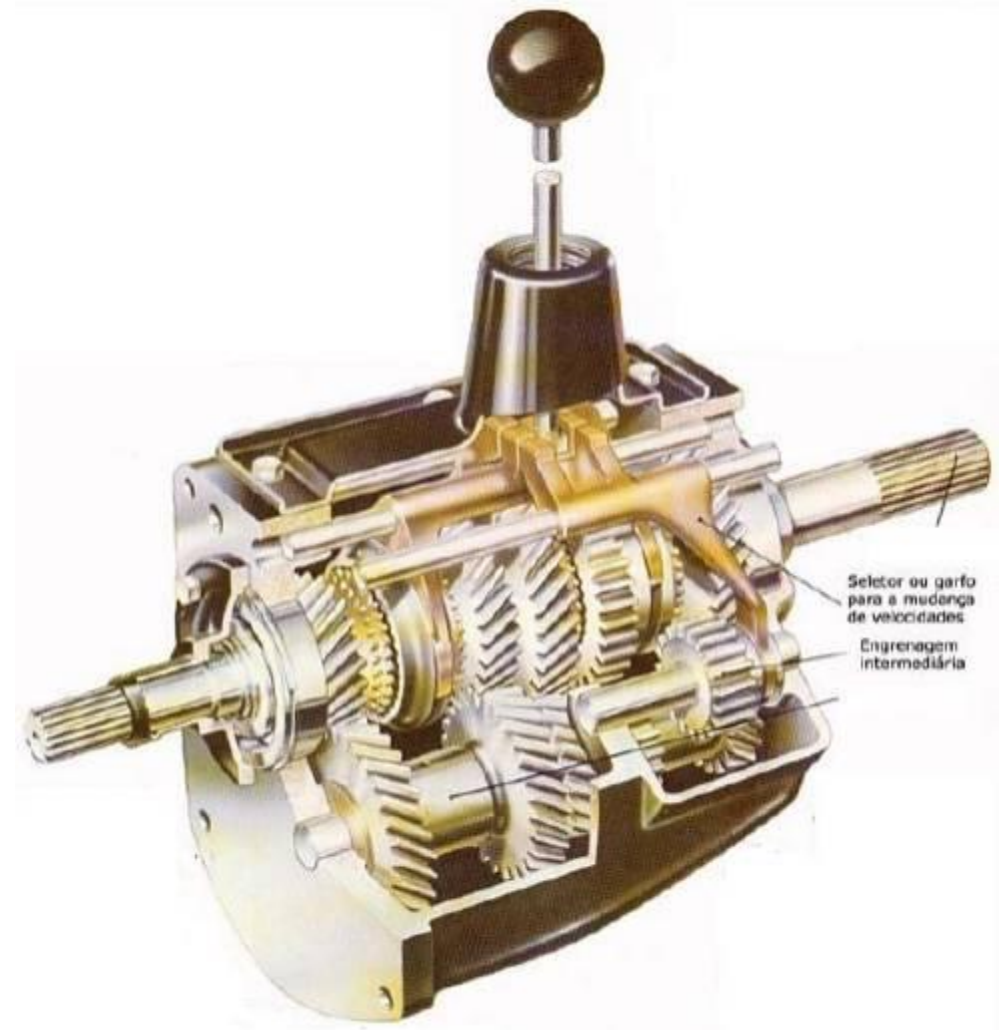
acoplamento de garras ativado



acoplamento de garras desativado



acoplamento de dentes ativado



Acoplamento Móvel

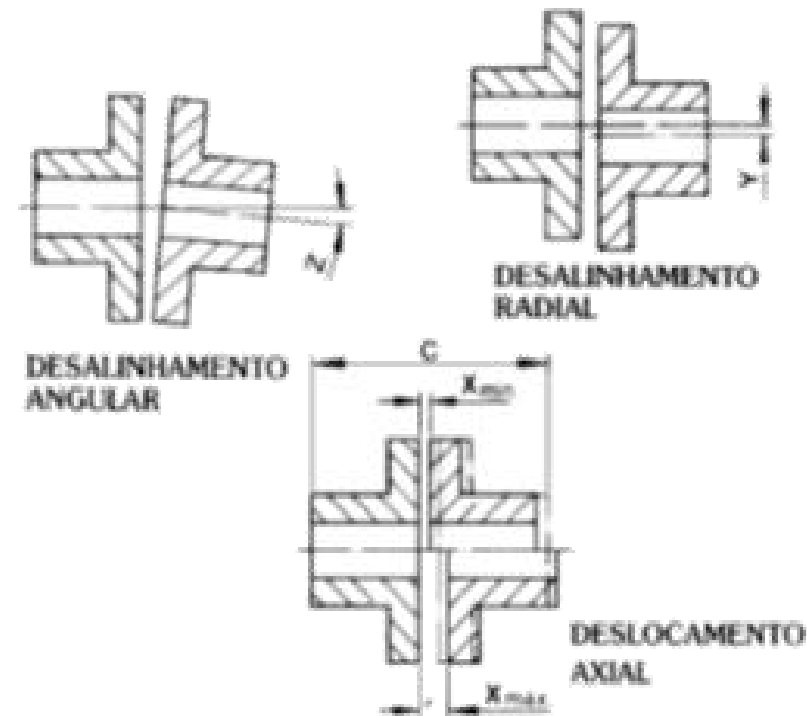
- Permite o jogo longitudinal das árvores
- Transmite força e movimento só quando acionado
- Pode ser de garras ou de dentes
- Acoplamento por meio de encaixe das garras ou dentes

Montagem dos acoplamentos

- Montar os flanges a quente, sempre que possível
- Evitar a montagem por meio de golpes
- Alinhamento das árvores deve ser o melhor possível
 - Incluindo acoplamentos elásticos

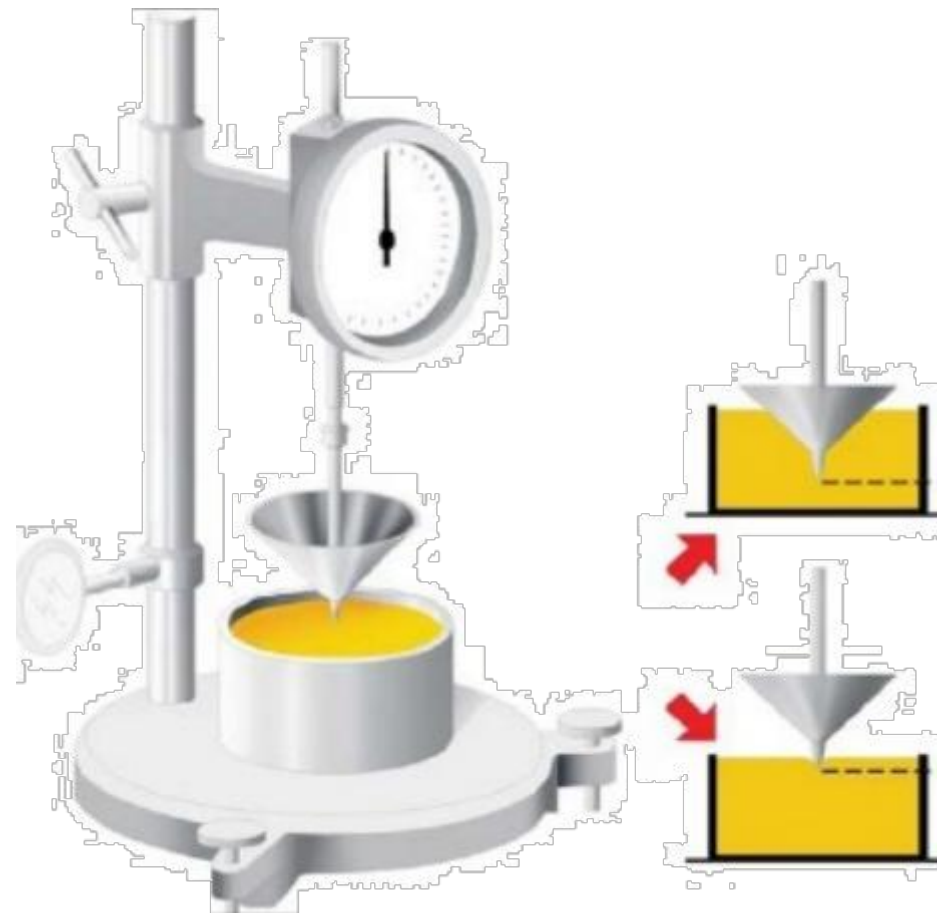
Montagem dos acoplamentos

- Na montagem, verificar
 - Folga entre os flanges
 - Alinhamento
 - Concentricidade do flange com a árvore
- Os acoplamentos necessitam de lubrificação
 - Recomendado pelo fabricante da máquina



Lubrificante

- Ponto de gota 150°C ou mais
- Baixo valor de separação do óleo
- A consistência NLGI 2 com penetração de 250 a 300
- O teste de penetração mede a profundidade de um cone padrão em uma amostra de graxa em décimos de milímetros



Lubrificante

- Alta resistência à separação por centrifugação
- Qualidades lubrificantes equivalentes às dos óleos minerais bem refinados de alta qualidade
- Não deve corroer aço ou deteriorar neoprene

Projeto

- O projeto de um acoplamento rígido envolve investigação das seguintes áreas críticas potenciais
 - Força cortante e esmagamento
 - Da chaveta
 - Dos parafusos de fixação
 - Incluindo a influência da
 - Pré-carga e/ou
 - Flexão dos parafusos do flange
 - Esmagamento do flange nas interfaces de fixação dos parafusos
 - Força cortante no cubo do flange

Acoplamento

- O acoplamento do tipo pneu surgiu nos anos 70
- Atualmente a necessidade é que os acoplamentos
 - Durem cada vez mais
 - Tenham maior capacidade de transmissão de torque
 - Utilizem cada vez menos espaço
- Qualquer aplicação que tenha um acionamento rotativo pode ter a presença de um acoplamento

Eixos

Eixos

- Não transmitem momento de torção
- Elementos de máquinas que servem para apoiar peças
- Dois tipos de eixos
 - Fixos
 - Móveis
- O eixo árvore transmite momento de torção
 - Solicitações
 - Torção
 - Flexão

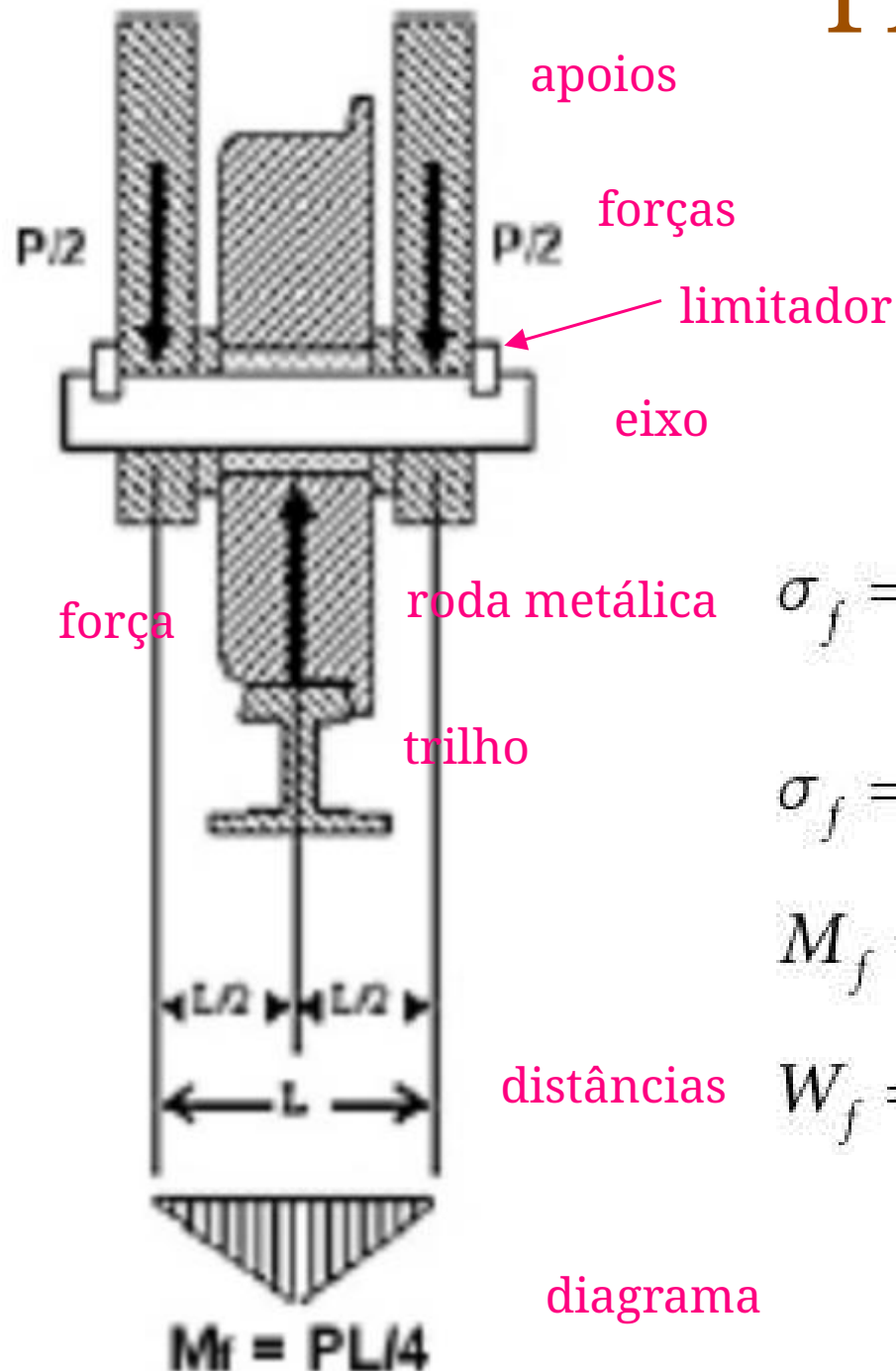
- São solicitados principalmente à flexão
- Classificação quanto ao tamanho
 - Se forem curtos são chamados de pinos
- Podem ser fabricados em aços carbono, aços Ni e Cr, aço Cr ou aço Ni-Cr-Mo

- Para dimensionamento dos eixos é necessário verificar quando em trabalho, a que forças estão sujeitos
- As principais forças são
 - Flexão Simples
 - Torção simples
 - Flexão-torção

Flexão Simples

- Deve-se calcular a seção do eixo para resistir a máxima tensão de flexão
- Para um eixo de seção homogênea, a tensão de flexão será a máxima onde for máximo o momento fletor

Flexão Simples



$$\sigma_f = \frac{M_f}{W_f}, \text{ onde:}$$

σ_f = Tensão de flexão

M_f = Momento de Flexão

W_f = Módulo de resistência a flexão

Torção simples

- Tensão de torção em uma determinada seção do eixo

$$\tau_t = \frac{M_t}{W_t}, \text{ onde:}$$

τ_t = Tensão de torção

M_t = Momento de torção

W_t = Módulo de resistência à torção

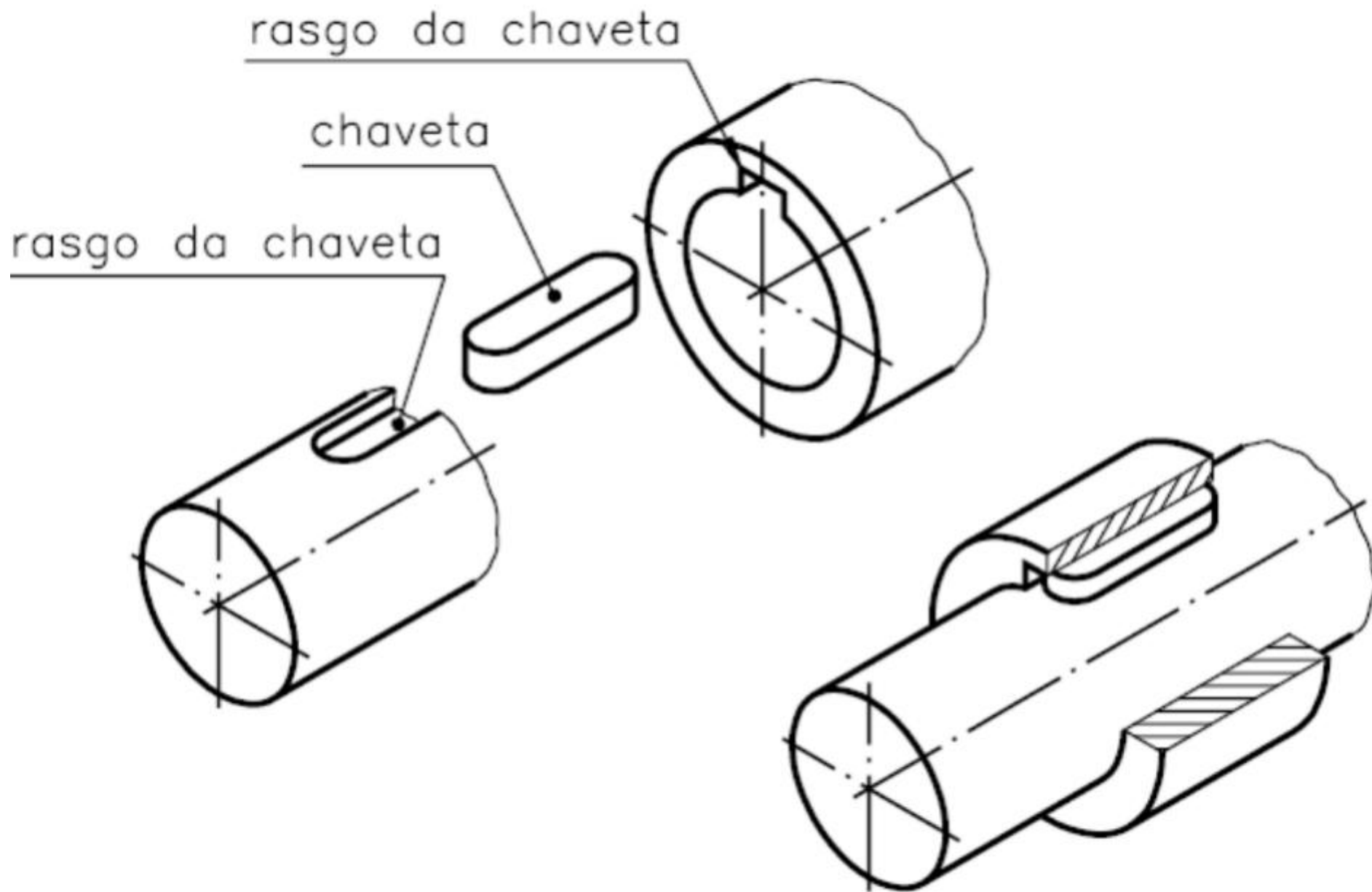
- Os valores das tensões de flexão e torção devem ser limitados a tensão admissível do material

Flexão-torção

- Para eixos submetidos a cargas devem ser calculados considerando a fadiga
- Os eixos devem ter bom acabamento (retificados)
- Rasgos de chavetas, canais, furos, etc., introduzem concentrações de tensão que devem ser considerados na avaliação do coeficiente de segurança

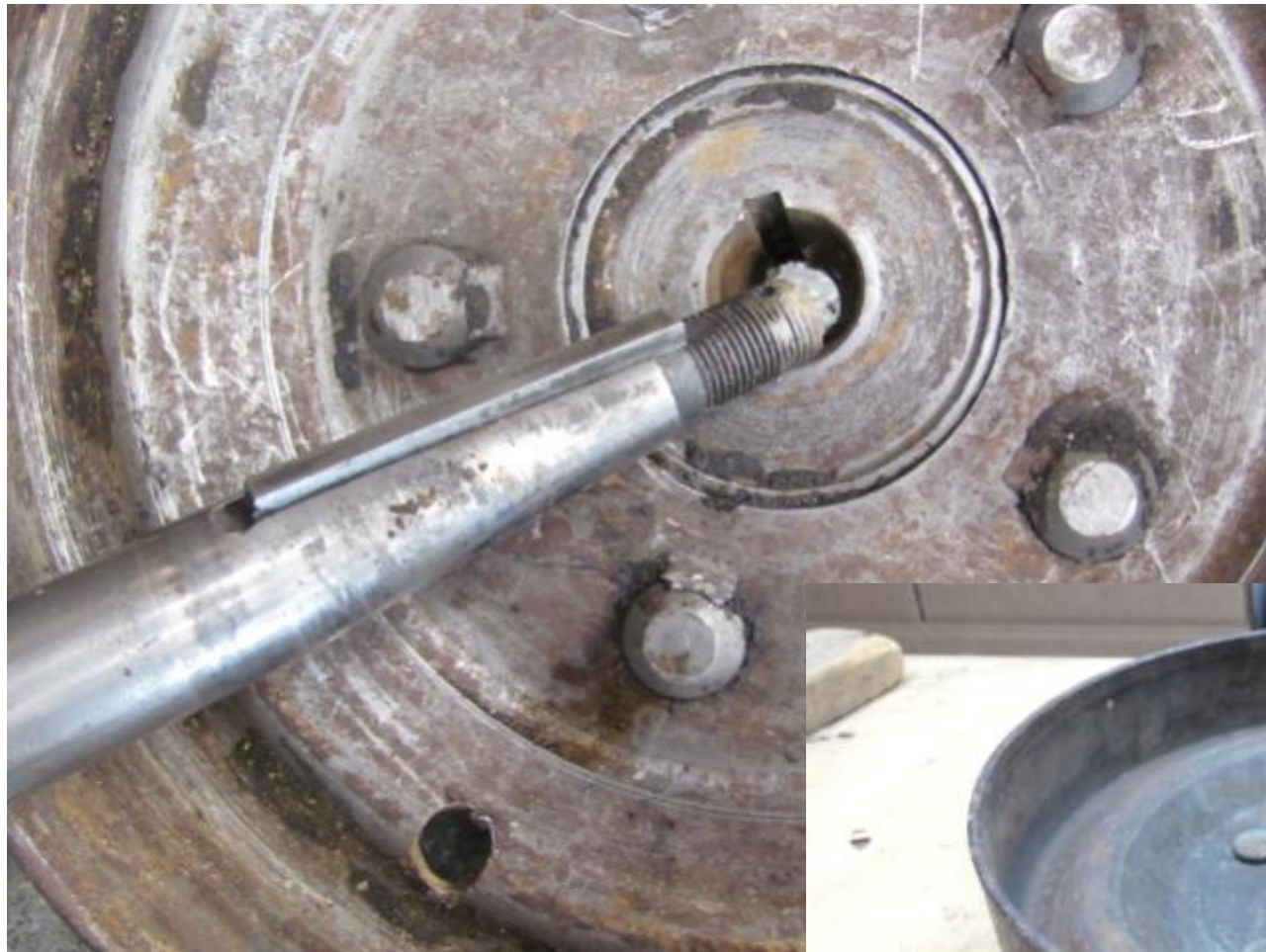
Chaveta

Chaveta



Chaveta

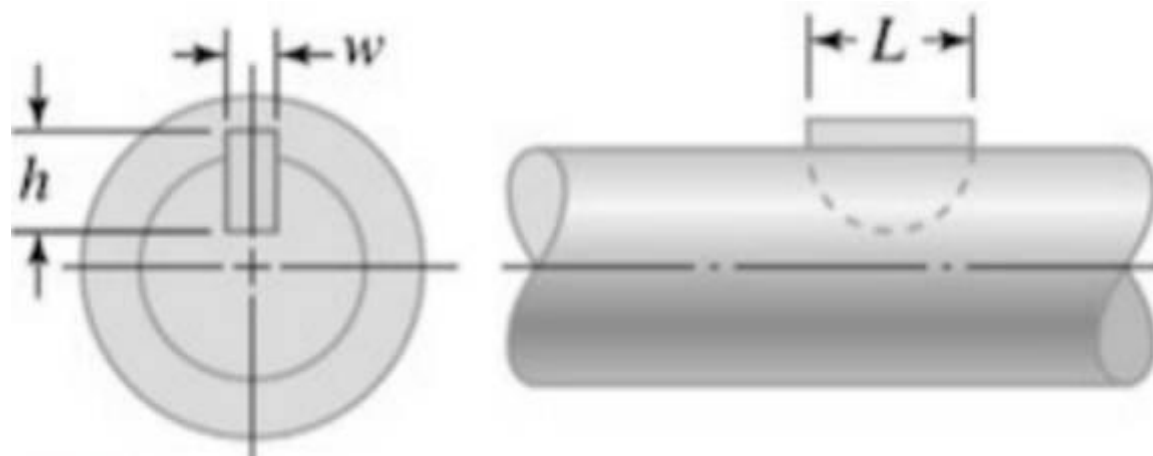




Exemplo:
Ford modelo T
eixo traseiro
panela de freio



Chaveta



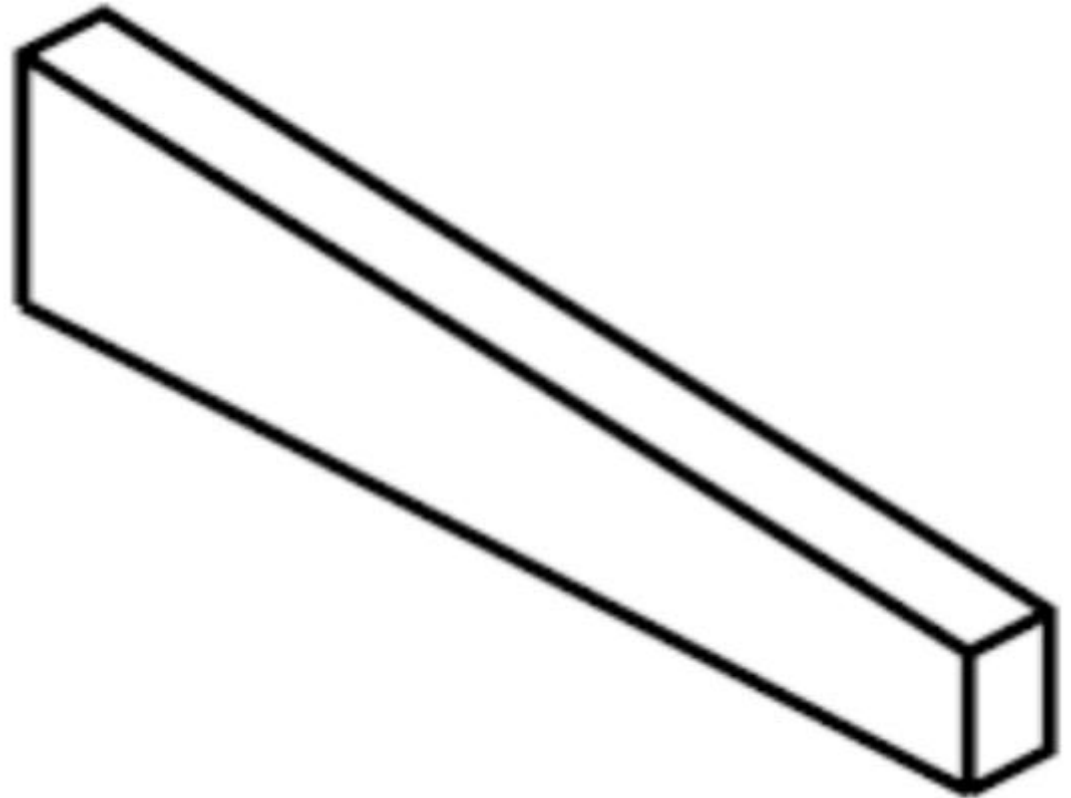
- Elementos de máquinas fabricadas em aço
- Se interpõem entre uma cavidade de um eixo, e de uma peça
- A finalidade de se utilizar a chaveta é ligar dois elementos mecânicos

Chaveta

- 2 modos de falhas em chaveta
 - Por cisalhamento
 - Ocorre quando a chaveta é cisalhada ao longo de sua largura
 - Por esmagamento
 - Ocorre em qualquer lado em compressão
- Classificação
 - Chaveta de cunha
 - Chaveta paralela
 - Chaveta de disco

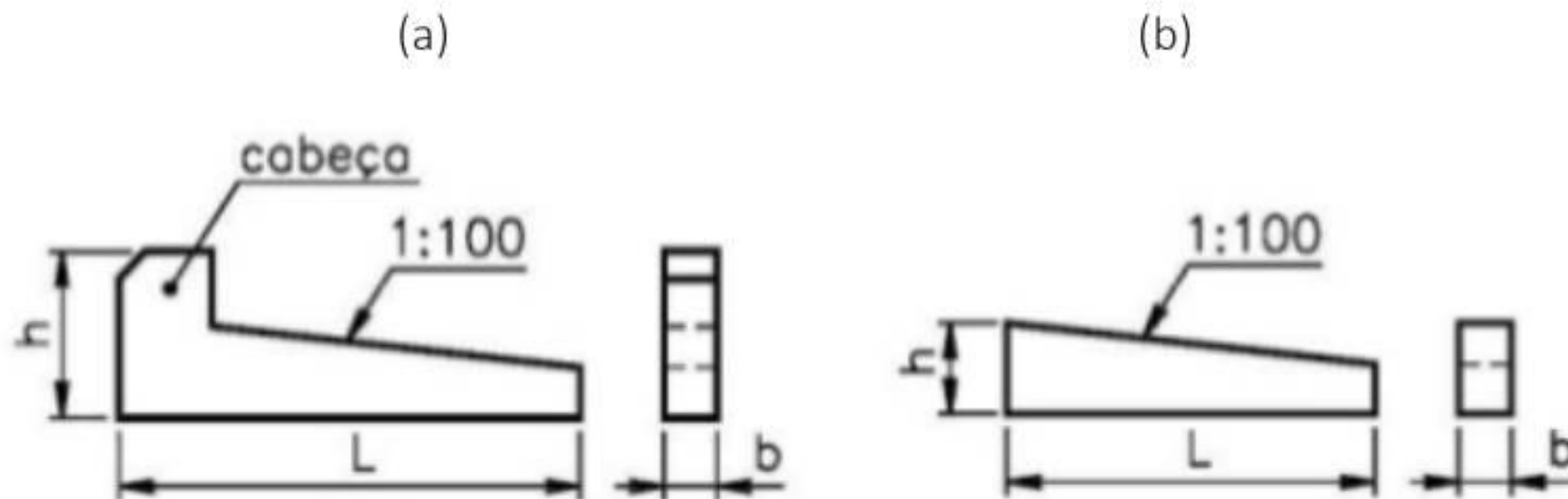
Chaveta de cunha - subdivisão

- Longitudinais
 - Encaixadas
 - Meia-cana
 - Planas
 - Embutidas
 - Tangenciais
- Transversais



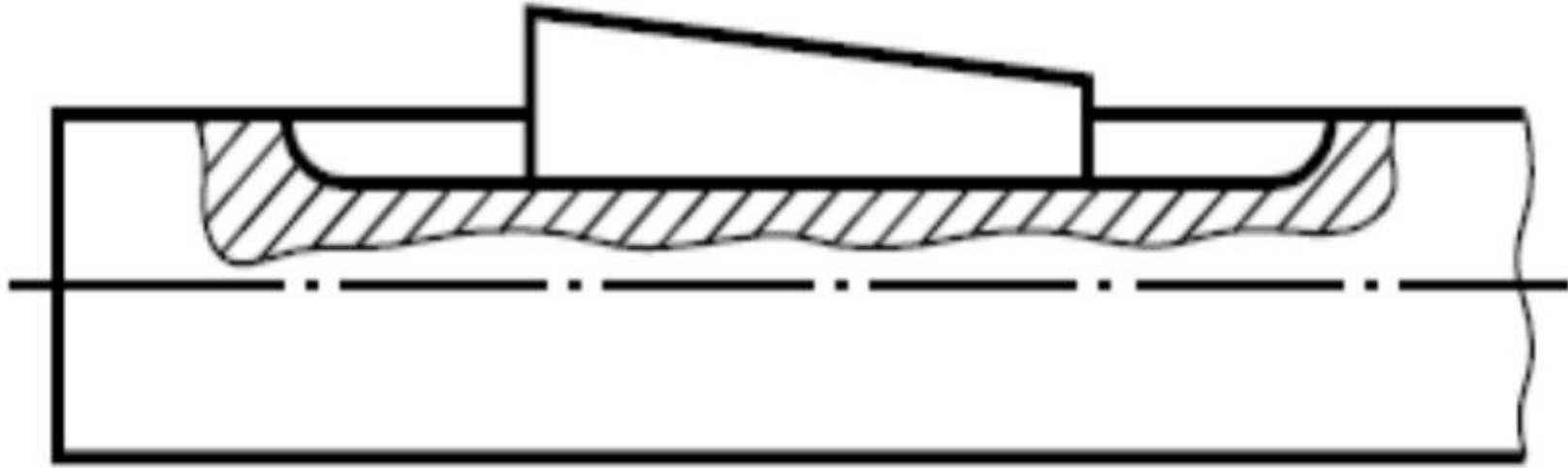
Longitudinais

Figura 3.9 | (a) Chaveta com cabeça e (b) chaveta sem cabeça



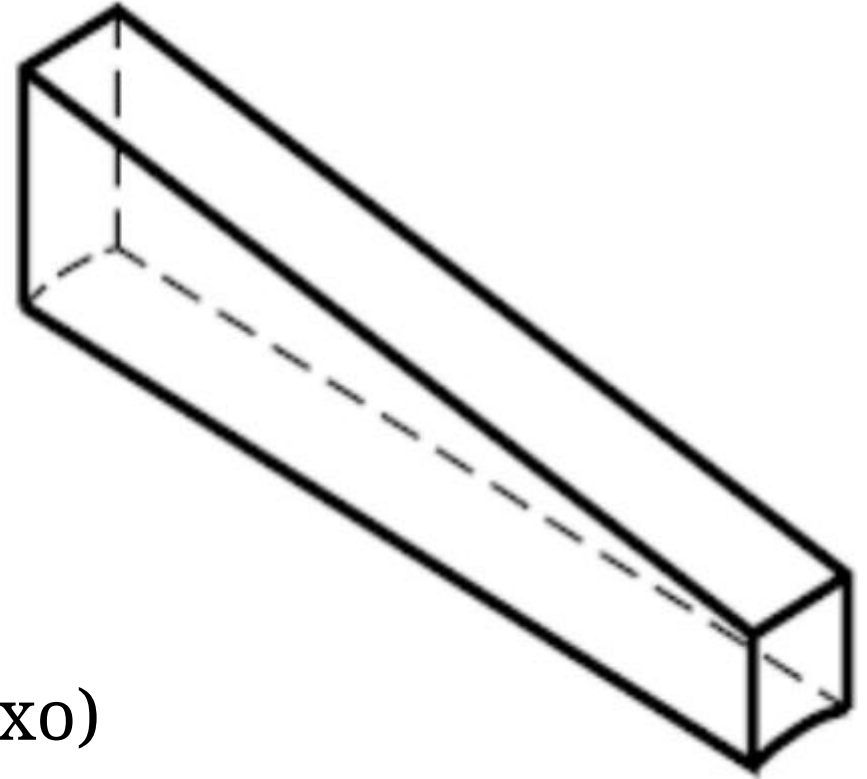
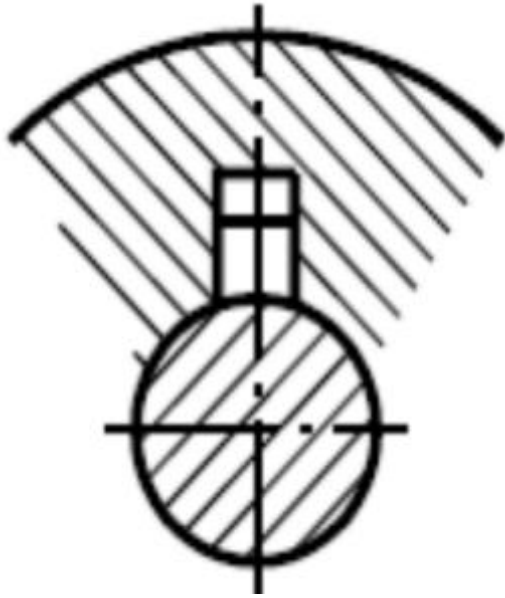
- São colocadas na extensão do eixo para unir roldanas, rodas, volantes, etc.
- Tem montagem e desmontagem fáceis

Encaixadas



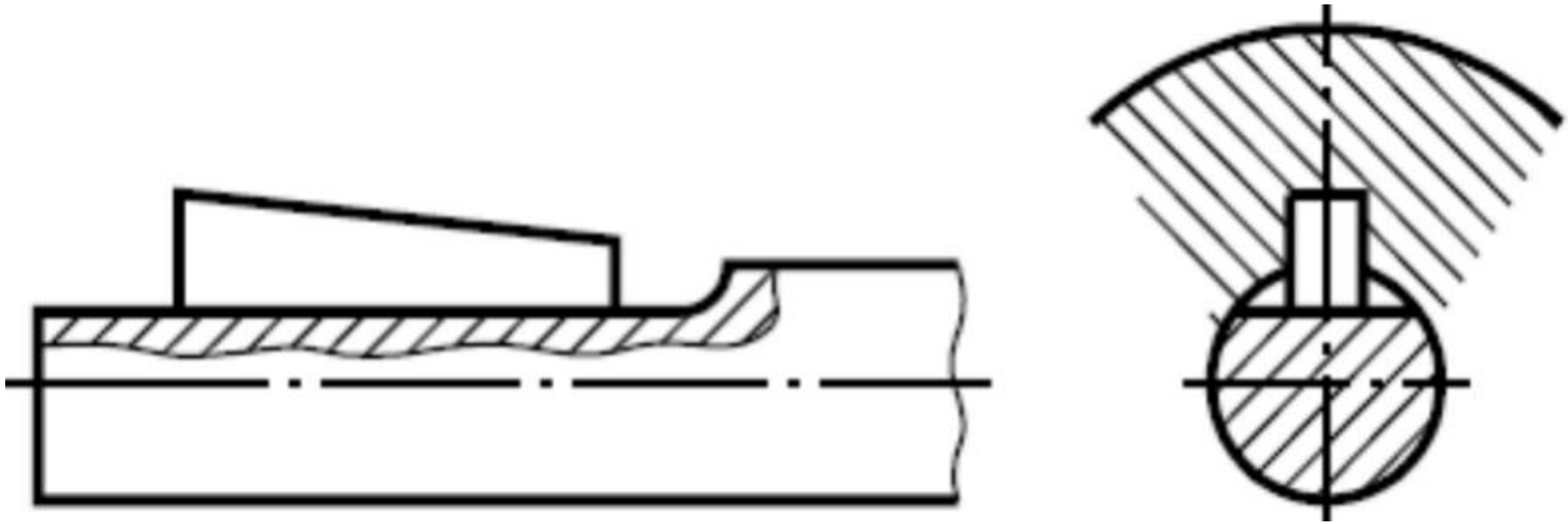
- Possuem forma do tipo mais simples de chaveta de cunha
- Seu rasgo do eixo é sempre mais comprido que a chaveta

Meia-cana



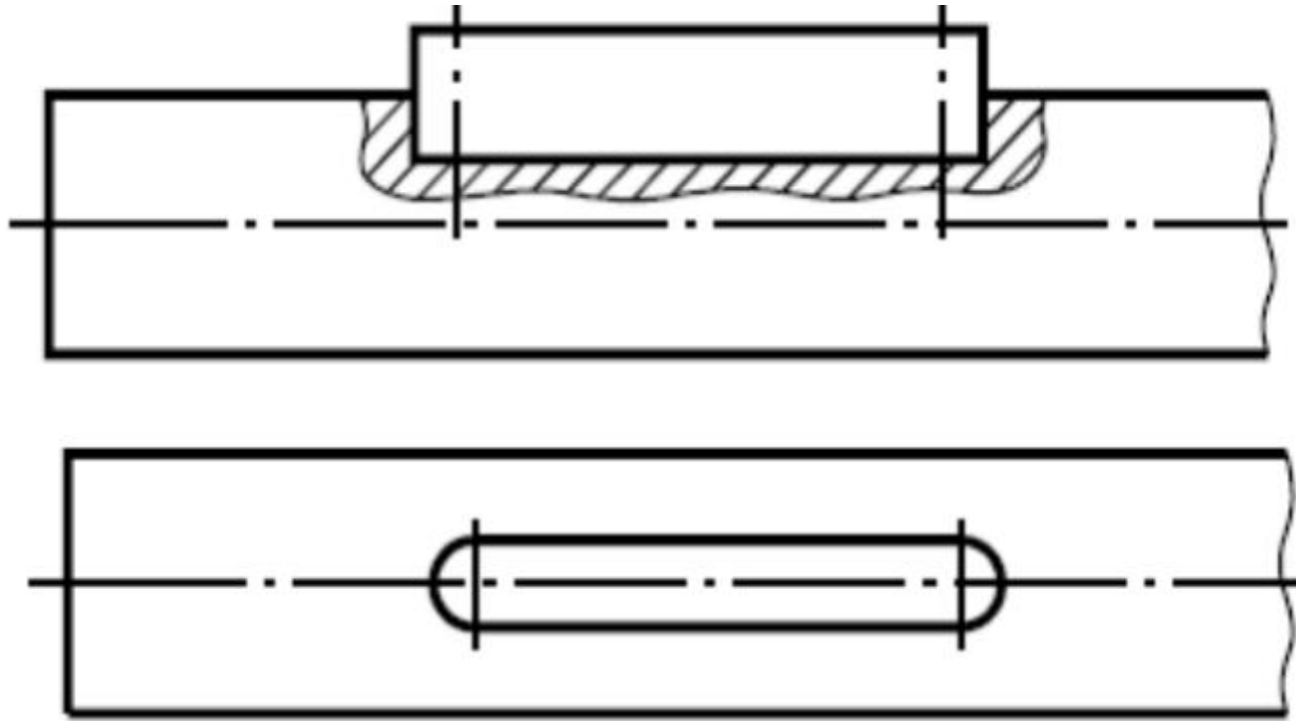
- Inclinação de 1:100
- Base côncava (mesmo raio do eixo)
- Podem ser com ou sem cabeça
- Não é necessário rasgo na árvore, pois ela transmite o movimento por atrito

Planas



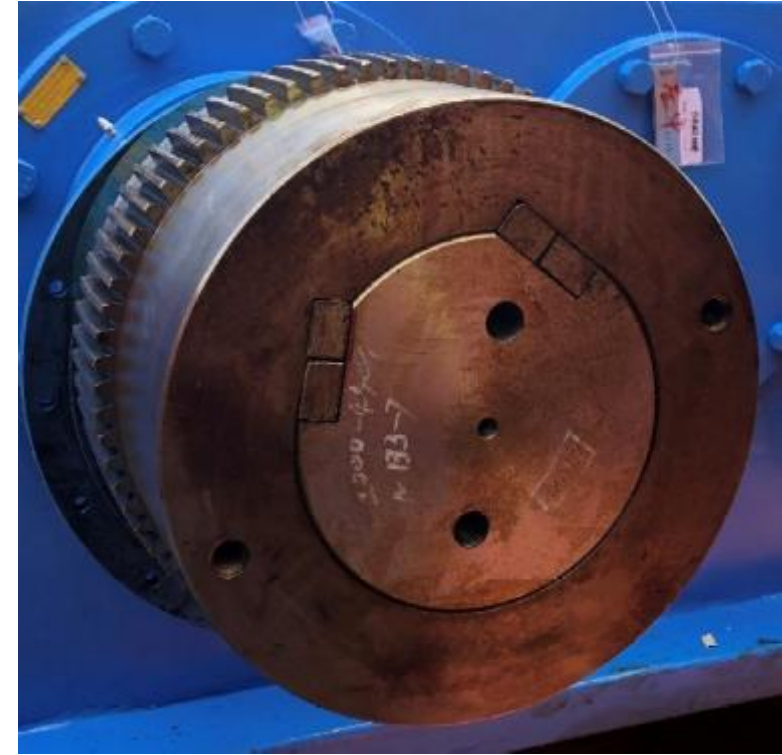
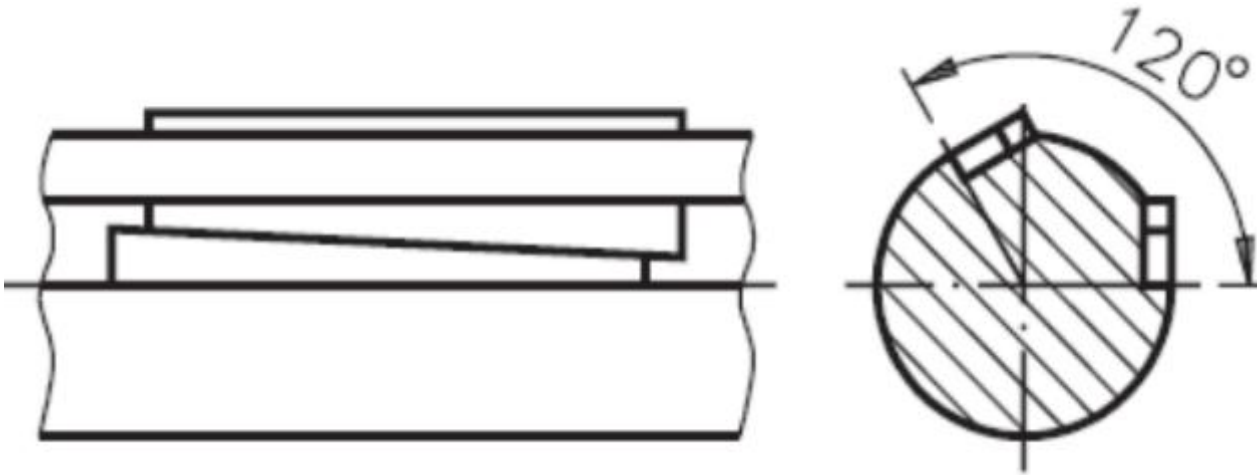
- Similares à chaveta encaixada
- A diferença é na montagem, pois nas chavetas planas não se abre o rasgo no eixo

Embutidas



- Tem os extremos arredondados
- O rasgo para alojamento no eixo possui o mesmo comprimento da chaveta
- Elas são embutidas e não têm cabeça

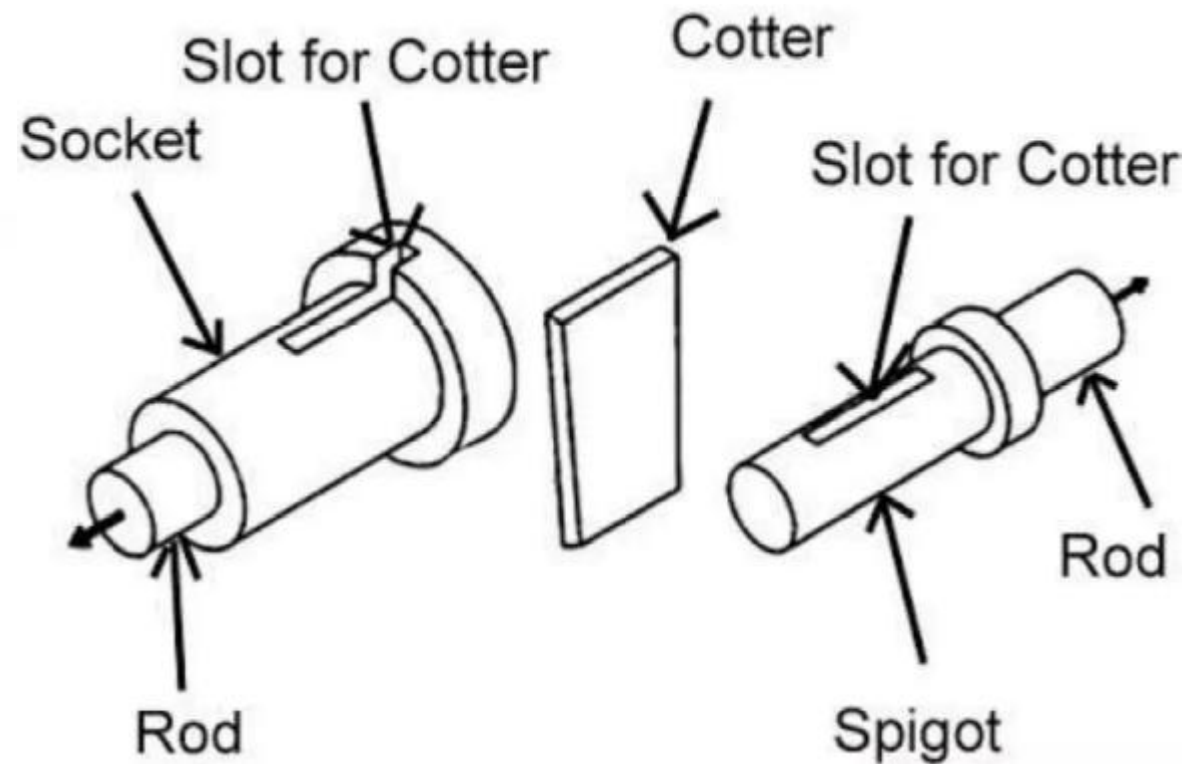
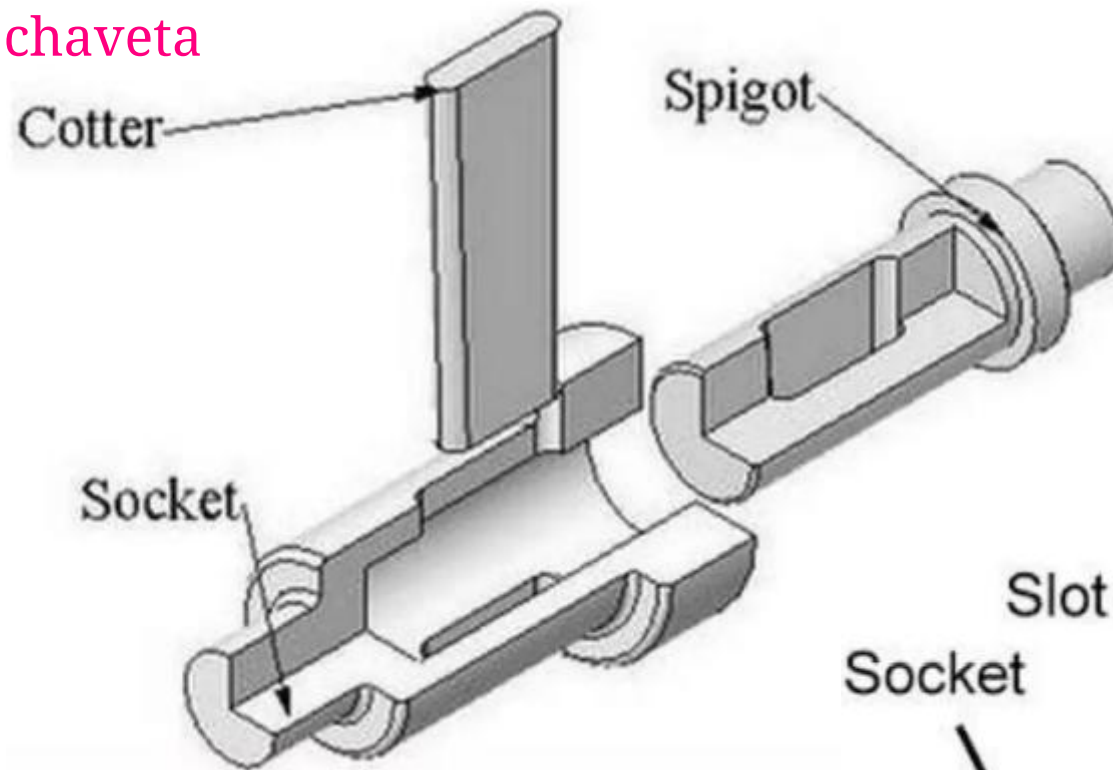
Tangenciais



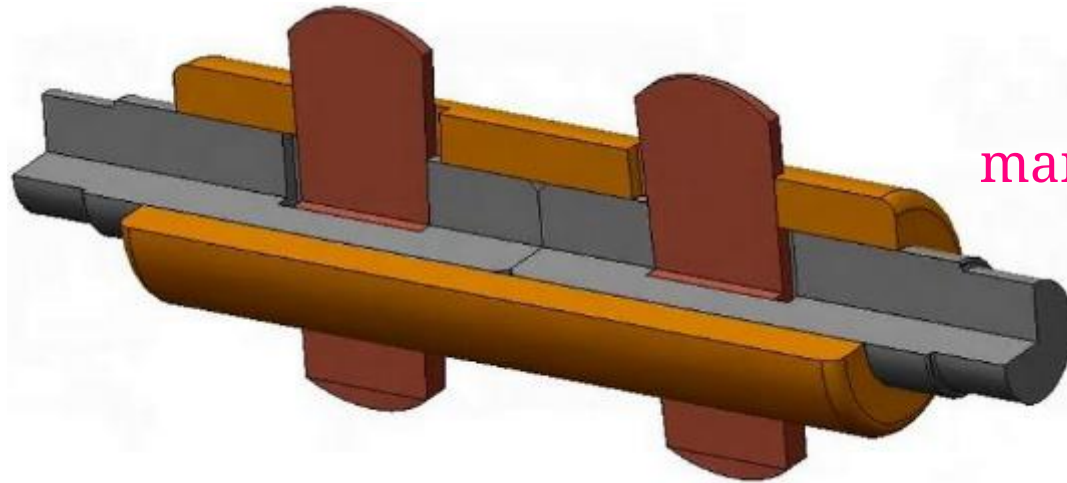
- Formadas por um par de cunhas colocadas em cada rasgo
- 2 chavetas que transmitem fortes cargas
- Utilizadas quando o eixo está submetido à mudança de carga ou golpes

Transversais

contrapino, ou
cunha, ou
chaveta



Transversais



manga

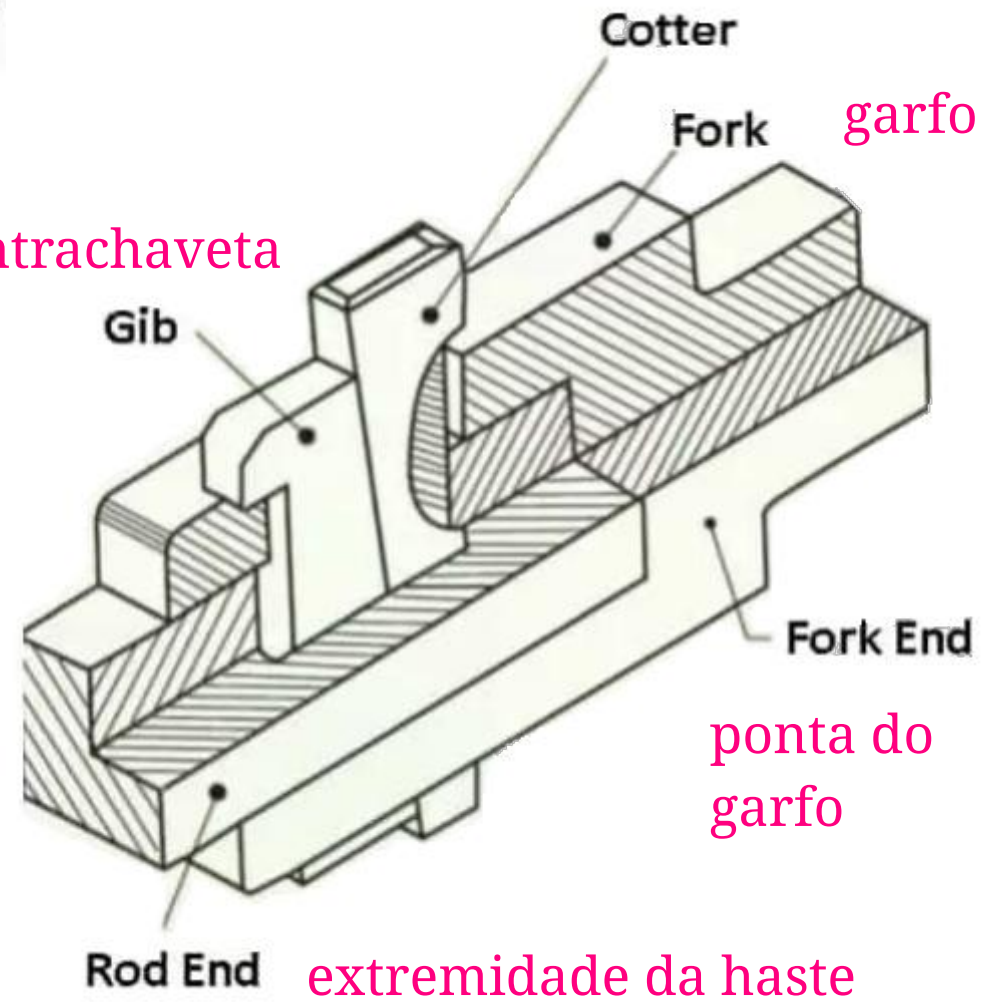


pedal de bicicleta



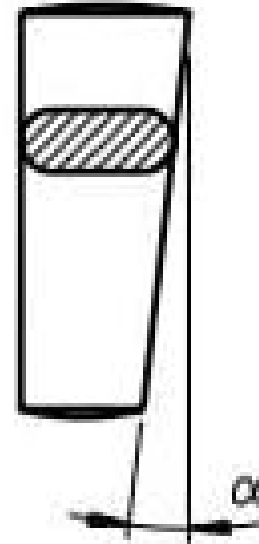
chaveta

contrachaveta

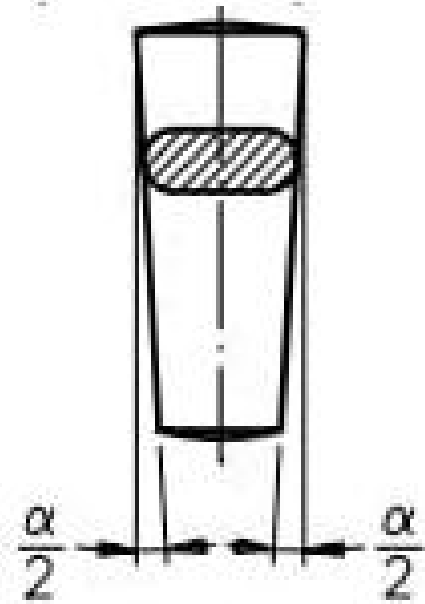


Transversais

- União de peças que transmitem movimentos
 - Rotativos
 - Retilíneos alternativos
- Simples
 - Inclinação apenas de um lado
- Duplas
 - Inclinação dos dois lados



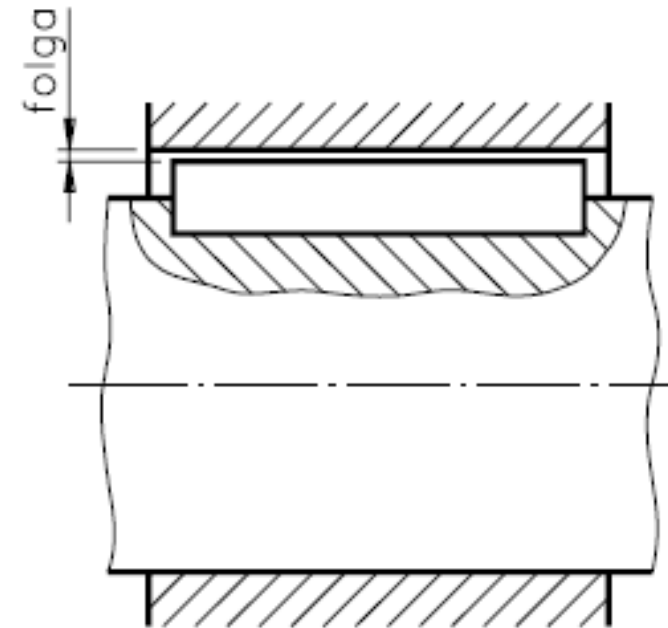
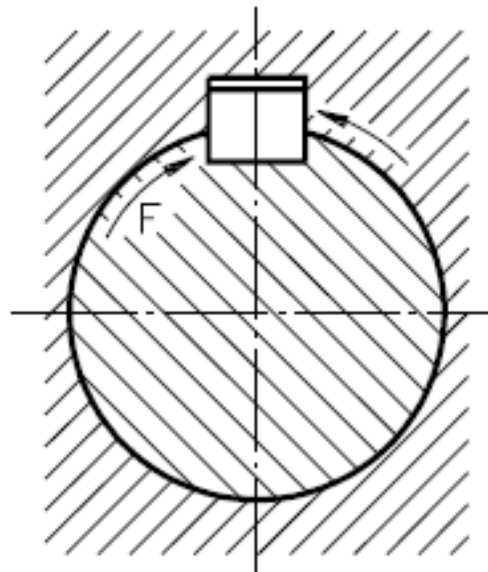
Inclinação simples



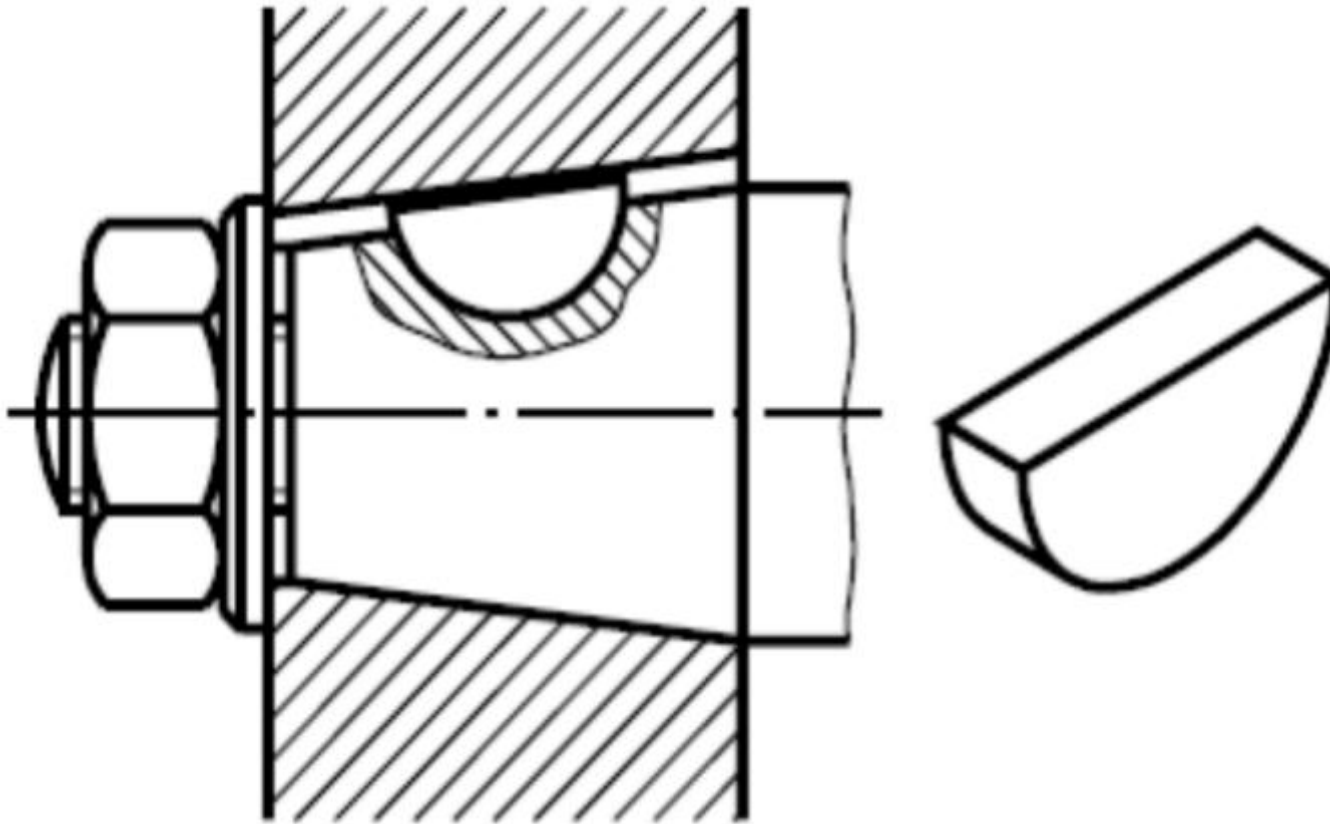
Inclinação dupla

Paralelas

- Também chamadas de linguetas
- Possuem as faces paralelas e não têm inclinação
- A tolerância deste tipo de chaveta pode ser por
 - Ajuste forçado, cuja montagem é fixa
 - Deslizante justo, cuja montagem é justa
 - Deslizante livre, cujas peças são móveis



Disco (tipo Woodruff)



- É uma variante da chaveta paralela
- Utilizada em eixo cônico, pois facilita a montagem

Projeto da chaveta

- Há poucas variáveis a serem dimensionadas
- O diâmetro do eixo já determina a largura da chaveta
- A altura é determinada pela largura
- O cálculo é apenas do comprimento da chaveta
- Para uma dada aplicação deve assegurar que o torque de operação seja transmitido sem falha
- Torques gerados por condições de sobrecargas não podem causar o cisalhamento

Estrias

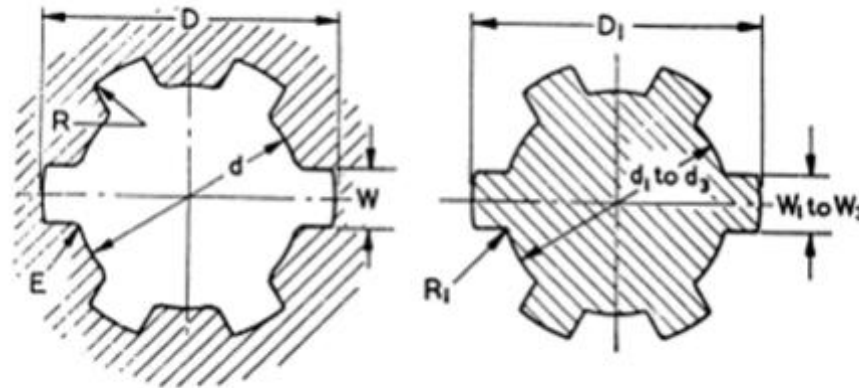
- Lembram um conjunto de várias chavetas que se encaixam em um cubo que também é ranhurado





- São utilizadas quando se necessita transmitir mais torque do que a chaveta suporta

Tipos de perfil



- Perfil de lados retos e paralelos
 - Paralelos ao eixo de simetria e apresentam uma série de ranhuras longitudinais em torno da sua circunferência
 - Essas ranhuras engrenam-se com os sulcos correspondentes de peças que serão montadas no eixo
 - A característica principal é transmitir grande força



- Perfil evolvente
 - A maior capacidade de carga
 - A concentração de tensões bem mais reduzidas
 - A centragem mais perfeita, pois tem tendência ao autoalinhamento resultante da sua construção
 - Possibilidade de execução em máquinas de grande produção e alta precisão

A SAE considera que 25% dos dentes estão em contato, logo pode-se calcular o comprimento da parte estriada com a equação

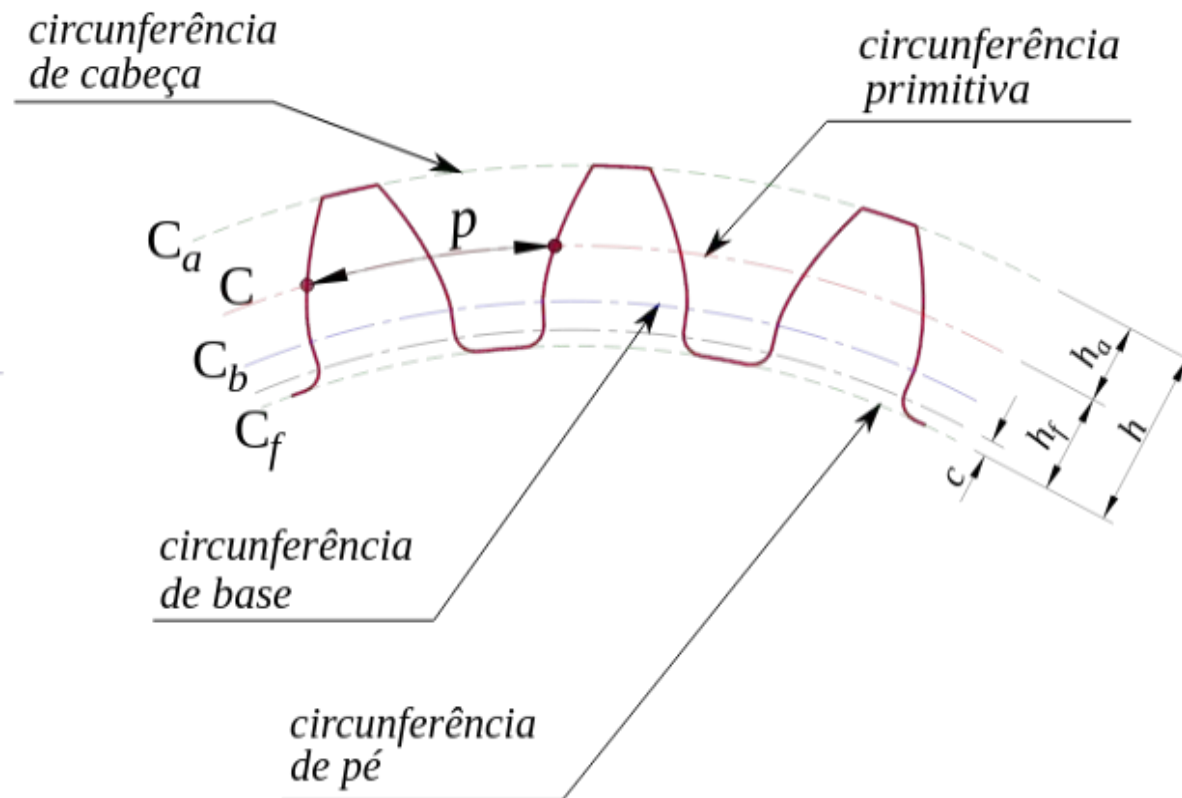
$$l = \frac{d_r^3 (1 - \frac{d_i^4}{d_r^4})}{d_p^2}$$

l = comprimento

d_r = diâmetro da raiz

d_i = diâmetro interno
(pé)

d_p = diâmetro primitivo



- A área submetida ao cisalhamento é calculada

$$A = \frac{\pi d_p l}{2}$$

- A tensão de cisalhamento na estria é calculada

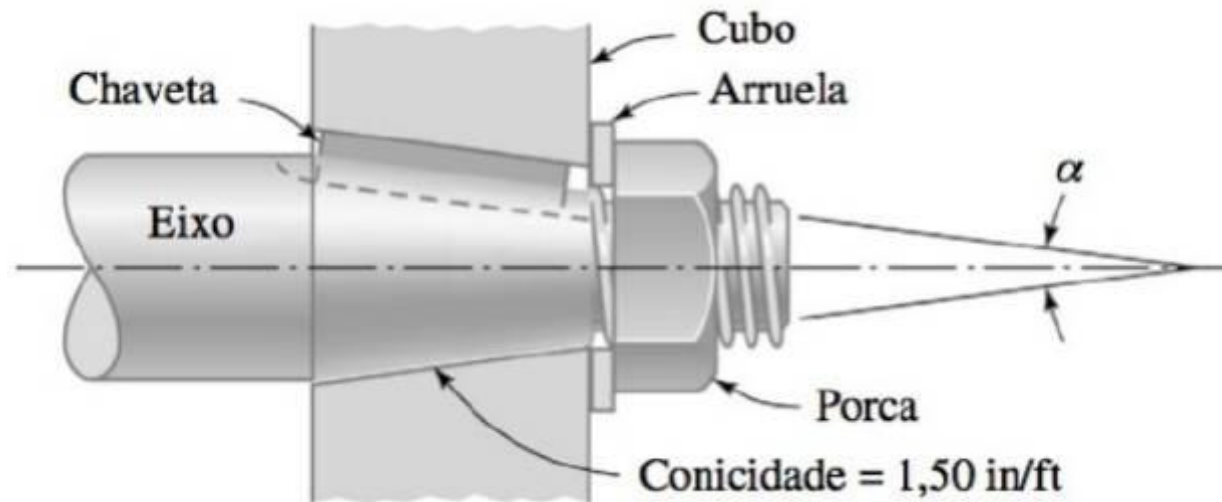
$$\tau = \frac{4F}{A} = \frac{4T}{r_p A} = \frac{8T}{d_p A} = \frac{16T}{\pi d_p^2 l}$$

- As estrias são manufaturadas no próprio eixo naturalmente
 - Sem necessidade de rasgos para encaixes, como ocorre nas chavetas
- Isso é bom pois os rasgos reduzem a capacidade do eixo de transmitir potência

Classificação conforme o perfil

- Perfil de lados paralelos
 - Apresenta várias ranhuras longitudinais ao eixo
 - É utilizado para transmitir uma grande força
- Perfil evolvental
 - Algumas vantagens sobre o perfil de lados paralelos
 - Maior capacidade de carga
 - Concentração de tensões reduzidas
 - Melhor centragem

Ajustes cônicos



- Usados na montagem de componentes de entrada ou de saída de potência na extremidade do eixo
- Geralmente a ponta do eixo é roscada e é utilizada uma porca para forçar o aperto axial do cone do eixo

Ajustes cônicos

- Esses ajustes geram uma boa concentricidade, porém, a capacidade de transmissão de torque é moderada
- Para aumentar essa capacidade, pode-se acrescentar uma chaveta de conexão cônica
- Os cones típicos que são utilizados são autotravantes
 - Pode existir extrator para facilitar a desmontagem
- Em alguns casos o ajuste é por interferência
 - Pode ser gerado pressionando axialmente ao eixo de um componente com o furo do cubo ligeiramente menor que o diâmetro de montagem do eixo

Exemplo 1

- Escolher o elemento de ligação que será utilizado no sistema de transmissão do implemento agrícola que está sendo projetado
- Sabe-se que o motor desse equipamento apresenta um torque de 40 kgf.m e uma rotação de 2.400 rpm
- O primeiro passo é calcular a potência necessária para saber qual elemento escolher

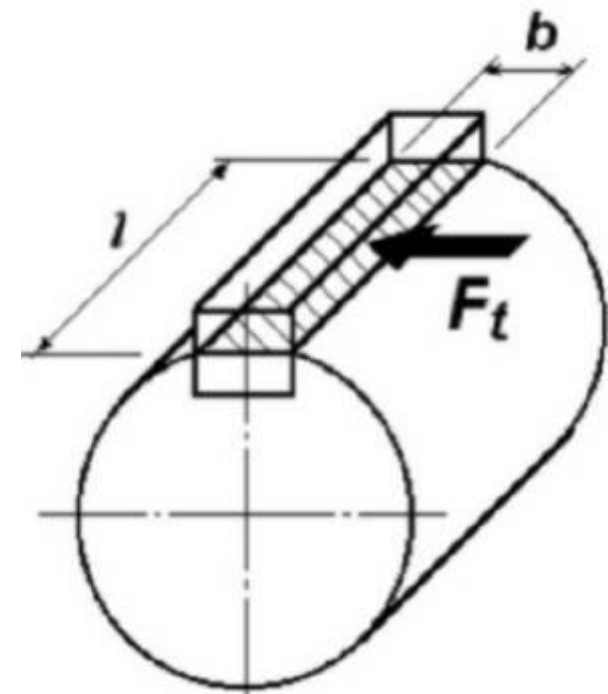
$$P(W) = T(Nm) \times \omega(rad / s)$$

$$T = 40kgfm = 40 \times 9,8 = 392Nm$$

$$\omega = \frac{2\pi n}{60.000} = \frac{2\pi \times 2.400}{60.000} = 0,25rad / s$$

$$P = 392 \times 0,25 = 98kW$$

- Como nesse caso será necessário transmitir torque, deverá ser utilizada a chaveta



- Sabemos que a máxima tensão de cisalhamento admissível é de 33,5 MPa

$$\tau_{adm} = \frac{F_t}{A} = \frac{F_t}{b \times l}$$

$$33,5 \times 10^6 = \frac{F_t}{b \times l}$$

- A força que a chaveta sofre é dada por

$$F_t = \frac{T}{r}$$

- O raio do eixo é de 20 mm e o torque de 392 Nm. Logo, a força é de 19.600 N. A área da chaveta deverá ser

$$33,5 \times 10^6 = \frac{19,6 \times 10^3}{A}$$

$$A = 5,85 \times 10^{-4} m^2 = 585 mm^2$$

Exemplo 2

- Carro compacto 1.0 flex de três cilindros
- Determinar frequência do motor
- Potência de 128 CV a 5.500 rpm
- Qual seria a força de tensão e a área da chaveta se o seu eixo for maciço de 25 mm de diâmetro?

- Como já calculado anteriormente,, a potência será de 94,14 KW
- Como nesse caso será necessário transmitir torque, deverá ser utilizada a chaveta
- Sabemos que a máxima tensão de cisalhamento admissível é de 53,3 MPa e o torque é de 163,5 Nm, logo, a força de tensão na chaveta será

$$F_t = \frac{T}{r} = \frac{163,5}{0,025} = 6,54 \times 10^3 N$$

- A área da chaveta será

$$\tau_{adm} = \frac{F_t}{A}$$

$$53,3 \times 10^6 = \frac{6,54 \times 10^3}{A}$$

$$A = 1,23 \times 10^{-4} m^2 = 123 mm^2$$

Referências

- SILVA, JJM. Elementos de Transmissão Acoplamentos. IFCE Sobral, 2014.
- BITENCOURT, D. Chavetas. IFSC Araranguá, 2010.
- ENGINEERING PRODUCT DESIGN. 2023.
 - Shaft key and keyway. <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/keys-keyways/>
 - Shaft Splines & Serrations. <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/splines-serrations/>

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

