



# DESIGN DE ESTRUTURAS AEROESPACIAIS

**Daniel Afonso**  
Escola Superior Aveiro Norte,  
Universidade de Aveiro  
Centro de Tecnologia Mecânica e  
Automação (TEMA)  
dan@ua.pt [www.ua.pt/pt/p/16609746](http://www.ua.pt/pt/p/16609746)

# SUMÁRIO

## Transmissão de movimento

- Relação entre velocidade
- Relação de binário/força

## Engrenagens

- Tipos de engrenagens

## Transmissão por elementos flexíveis

- Tipos de componentes

## Fixação de componentes em veios



universidade de aveiro  
theoria poiesis praxis



# TRANSMISSÃO DE MOVIMENTO

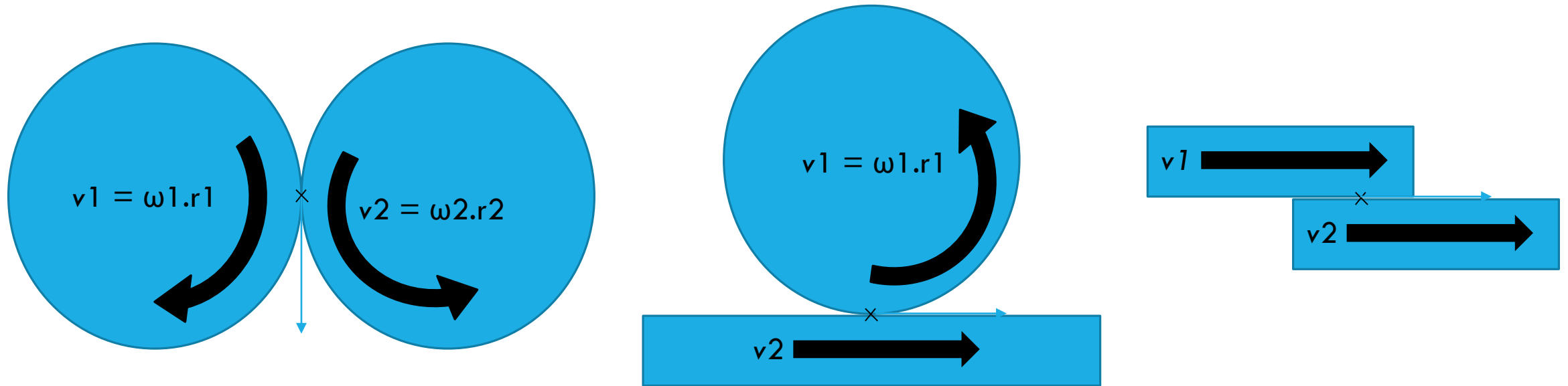
Componentes



# TRANSMISSÃO DE MOVIMENTO

Corpos ligados por atrito

Velocidade linear do ponto de contacto é comum em ambos os corpos



# TRANSMISSÃO DE MOVIMENTO

## Transmissão de movimento de rotação em movimento de rotação

- $v1 = v2 \Leftrightarrow \omega1.r1 = \omega2.r2 \Leftrightarrow \frac{\omega1}{\omega2} = \frac{r2}{r1} = \frac{d2}{d1} = \frac{n1}{n2}$ 
  - $v$  – velocidade tangencial (m/s)
  - $\omega$  – velocidade angular (rad/s)
  - $n$  – velocidade angular (rpm)
  - $r$  – raio da roda (m)
  - $d$  – diâmetro da roda (m)

## Transmissão de movimento de rotação em movimento de translação

- $v1 = v2 \Leftrightarrow v2 = \omega1.r1 = \frac{n1 \times 60}{2.\pi} . r1$

# TRANSMISSÃO DE MOVIMENTO

Pela lei da ação reação, a força é igual no ponto de contacto das duas rodas

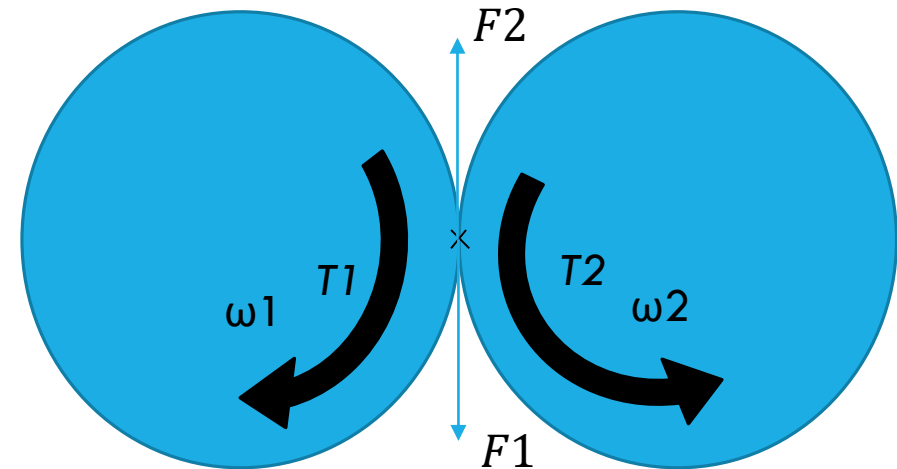
$$F_u = \frac{2 \cdot T}{d}$$

$$F1 = F2$$

$$\frac{2 \cdot T1}{d1} = \frac{2 \cdot T2}{d2}$$

$$\frac{T1}{T2} = \frac{d1}{d2}$$

$$\frac{T1}{T2} = \frac{d1}{d2} = \frac{\omega2}{\omega1} = \frac{n2}{n1}$$



# TRANSMISSÃO DE MOVIMENTO

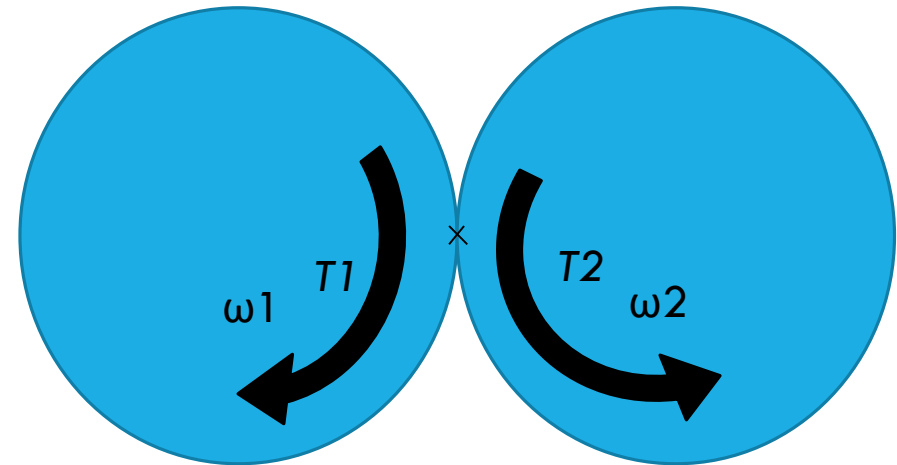
Pela lei da conservação de potência, a potência é constante

$$P1 = P2$$

$$T1 \cdot \omega1 = T2 \cdot \omega2$$

$$\frac{T1}{T2} = \frac{\omega2}{\omega1}$$

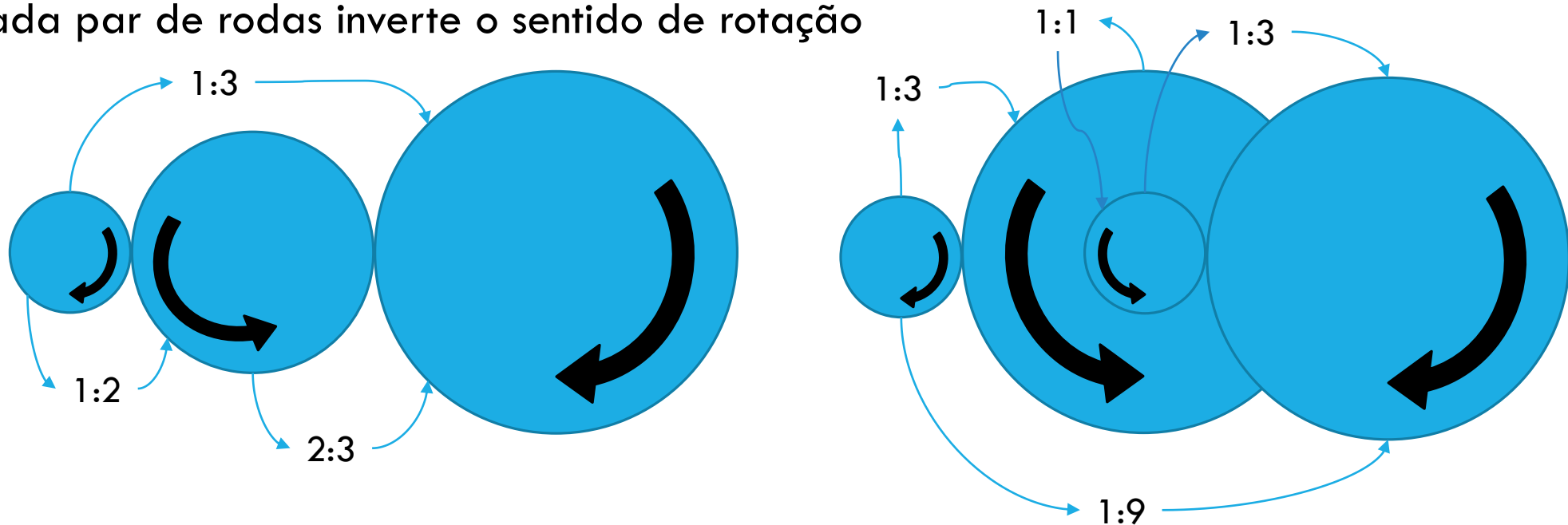
$$\frac{T1}{T2} = \frac{d1}{d2} = \frac{\omega2}{\omega1} = \frac{n2}{n1}$$



# RELAÇÃO DE TRANSMISSÃO E SENTIDO DE ROTAÇÃO

Por norma, uma relação de transmissão não deve ultrapassar 1:5 - Relações de transmissão superiores são o resultado de vários andares de transmissão

Cada par de rodas inverte o sentido de rotação

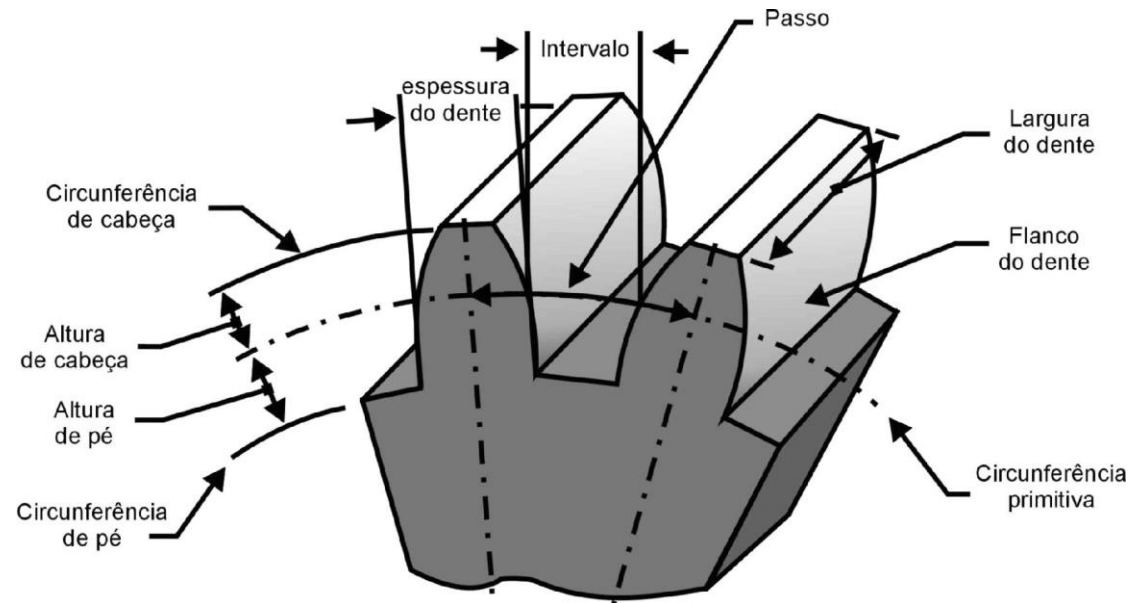




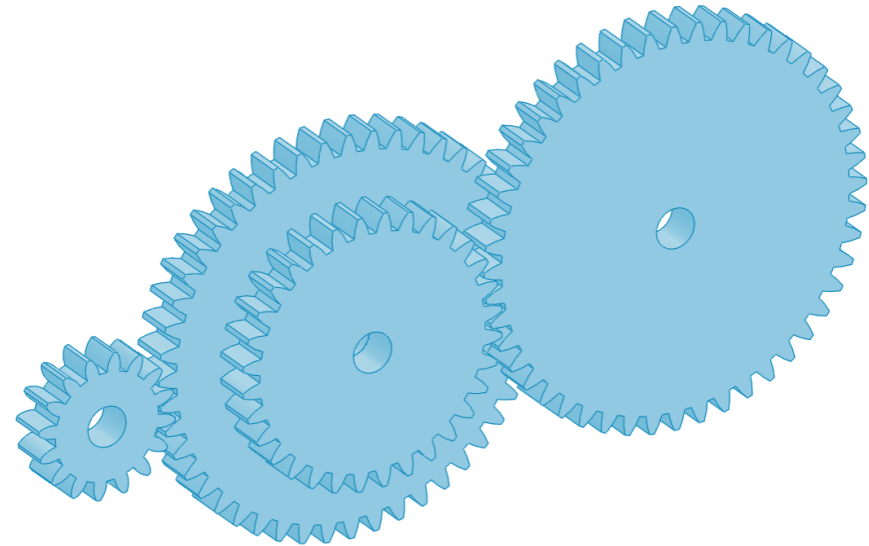
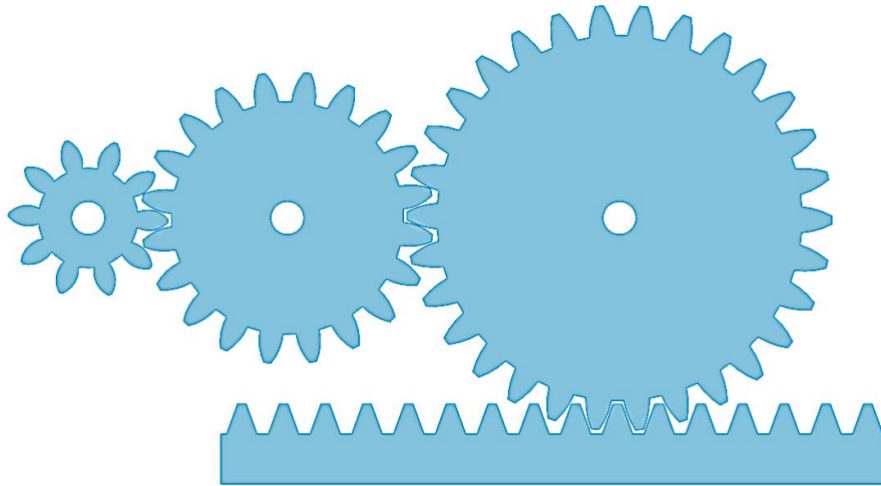
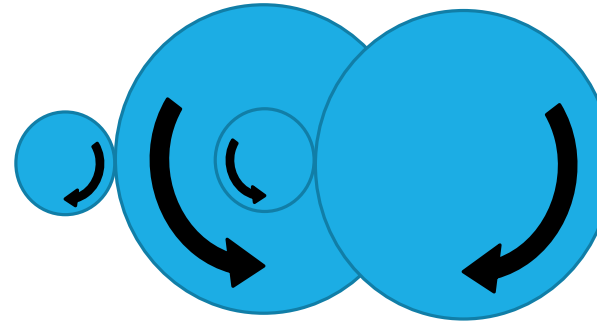
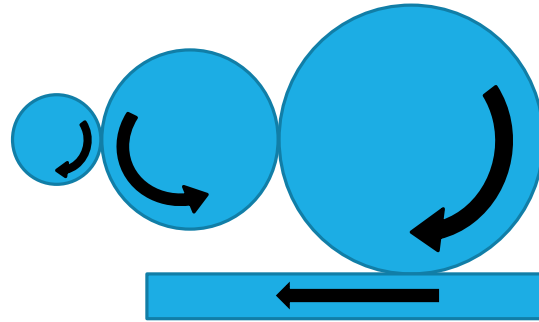
# TRANSMISSÃO DE MOVIMENTO COM ENGRENAGENS

Transmissão de movimento por rodas de atrito pode ser sujeita a escorregamento

Utilização de engrenagens – rodas dentadas – permite a transmissão de movimento de roda com interferência mecânica



# TRANSMISSÃO DE MOVIMENTO COM ENGRENAGENS



# TRANSMISSÃO DE MOVIMENTO COM ENGRENAGENS

## Rodas caracterizadas por:

- Módulo da roda
  - $m_1 = m_2 = \text{passo}/\pi$
- Número de Dentes
  - $z_1$  e  $z_2$
- Diâmetro Primitivo
  - $d_1 = m.z_1$  e  $d_2 = m.z_2$
- Velocidade de rotação
  - $n_1$  e  $n_2$
- Entre-eixo
  - $a = (d_1 + d_2)/2$



# TRANSMISSÃO DE MOVIMENTO COM ENGRENAGENS

## Relação de transmissão

- Relação de transmissão análoga a transmissão por rodas de atrito

- $\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{d_2}{d_1} = \frac{z_2}{z_1}$

- $\frac{T_1}{T_2} = \frac{z_1}{z_2} = \frac{d_1}{d_2}$

- $v_2 = \omega_1 \cdot r_1 = \omega_1 \cdot \frac{m \cdot z_1}{2}$

- $F_2 = \frac{2 \cdot T_1}{d_1}$




# RODAS DE DENTADO RETO

Transmissão de movimento de rotação entre eixos paralelos ou transmissão de movimento de rotação para translação



# RODAS DE DENTADO RETO



Geometria simples – fácil fabrico

Eficientes – o binário de um eixo é transmitido ao segundo eixo com uma eficiência próxima de 100%

Fáceis de montar – a montagem é feita na direção axial

Possibilidade de operação interior ou exterior

Ruidoso – transmissão de movimento provoca vibrações e consequentemente ruído

Folgas e impacto – maioritariamente em mudança de binário a ser transmitido




# RODAS DE DENTADO HELICOIDAL

Transmissão de movimento de rotação entre veios ou transmissão de movimento de rotação para translação



# RODAS DE DENTADO HELICOIDAL




Operação mais silenciosa – o contacto entre dentes é gradual, resultando numa transmissão menos ruidosa

Resistência – possibilidade de transmitir binários mais elevados com rodas do mesmo módulo

Possibilidade de transmissão de rotação entre eixos não paralelos

Possibilidade de operação interior e exterior



Menor eficiência – escorregamento entre superfície provoca atrito que dissipa potência

Maior custo de fabrico e montagem – geometria mais complexa complica fabrico e impede montagem axial de rodas independentes

# RODAS DE DENTADO HELICOIDAL

Rodas com ângulos opostos transmitem movimento entre eixos paralelos ou entre rodas e cremalheiras

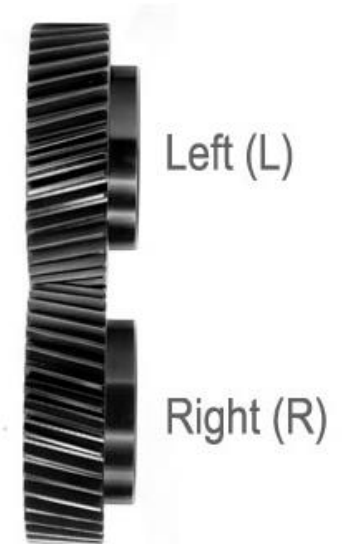
Rodas com a mesma direção de ângulo transmitem movimento entre eixos não paralelos



Pinion (L) & Rack (R)



Pinion (L) & Rack (R)



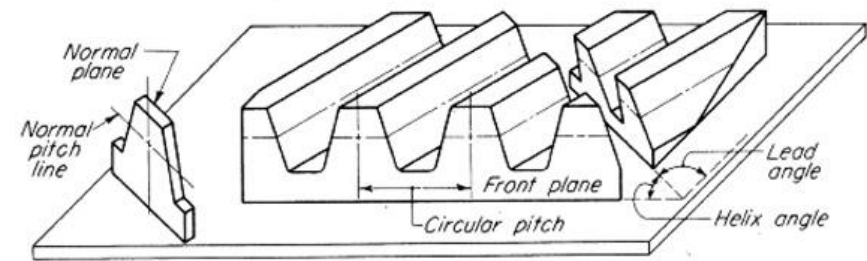
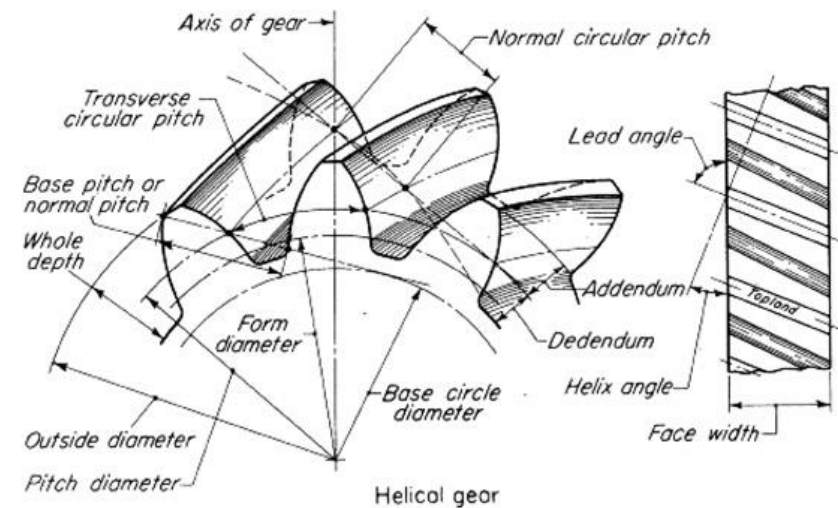
Left (L)

Right (R)

# RODAS DE DENTADO HELICOIDAL

## Rodas caracterizadas por:

- Módulo da roda
  - $m_1 = m_2$
- Ângulo da hélice
  - $\beta_1 = \beta_2$  – para eixos paralelos
- Diâmetro Primitivo
  - $d_1 = m \cdot z_1 / \cos(\beta_1)$
  - $d_2 = m \cdot z_2 / \cos(\beta_2)$



# ENGRENAGENS CÔNICAS

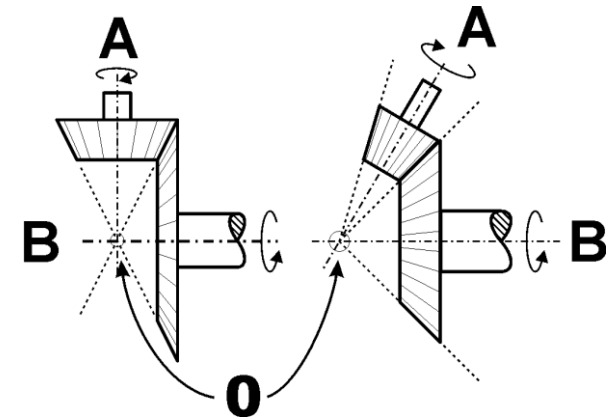
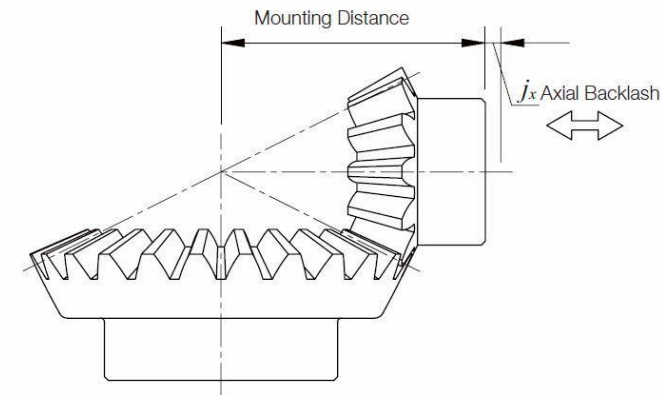
Transmissão de movimento de rotação entre eixos concorrentes



# ENGRENAGENS CÔNICAS

Rodas montadas em veios concorrentes permitem transmissão de rotação com grande eficiência

Possibilidade de fabrico e montagem de engrenagens cônicas com dentado reto ou helicoidal






# TRANSMISSÃO POR PARAFUSO SEM FIM

Transmissão de movimento de rotação entre eixos concorrentes com grande relação de transmissão



# TRANSMISSÃO POR PARAFUSO SEM FIM



Possibilidade de grandes relações de transmissão –  
Solução de transmissão compacta

Operação silenciosa e contínua –  
provoca pouca vibração

Transmissão de movimento apenas num sentido  
(particularmente com parafusos de uma entrada)

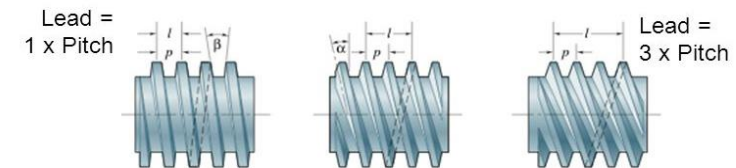
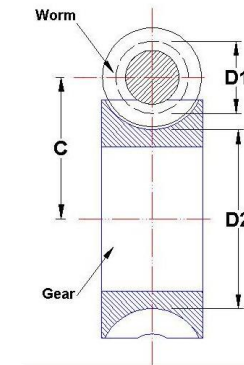
Menor eficiência –  
escorregamento entre superfície provoca atrito que dissipa potência

Transmissão de movimento apenas num sentido

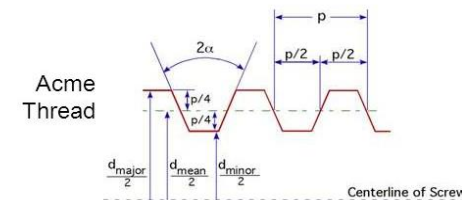
# TRANSMISSÃO POR PARAFUSO SEM FIM

## Transmissão caracterizada por:

- diâmetro do parafuso
  - $d_1$
- Número de entradas do parafuso
  - $z_1$
- diâmetro da roda
  - $d_2$
- Número de dentes da roda
  - $z_2$



Single-, double-, and triple-threaded screws.  
Also called single-, double-, and triple-start.




Acme threads are used in C-Clamps, vices, and cartoons.

# TRANSMISSÃO POR FUSO

Transmissão de movimento de rotação de um fuso em movimento de translação de um carro



# TRANSMISSÃO POR FUSO



Grande precisão e repetibilidade – utilização exclusiva de elementos rígidos

Grande eficiência na transmissão de potência (com fuso de esferas)

Baixa custo – particularmente em montagens com porcas

Capacidade de transmissão de potência limitada

Velocidade linear limitada – sistema não compatível com grandes velocidades ou força máxima e eficiência diminui com grandes velocidades

# TRANSMISSÃO POR ELEMENTOS FLEXÍVEIS

Utilização de engrenagens utiliza apenas componentes rígidos

- Implica montagem precisa do entre eixo do movimento
- Implica alinhamento preciso entre os eixos

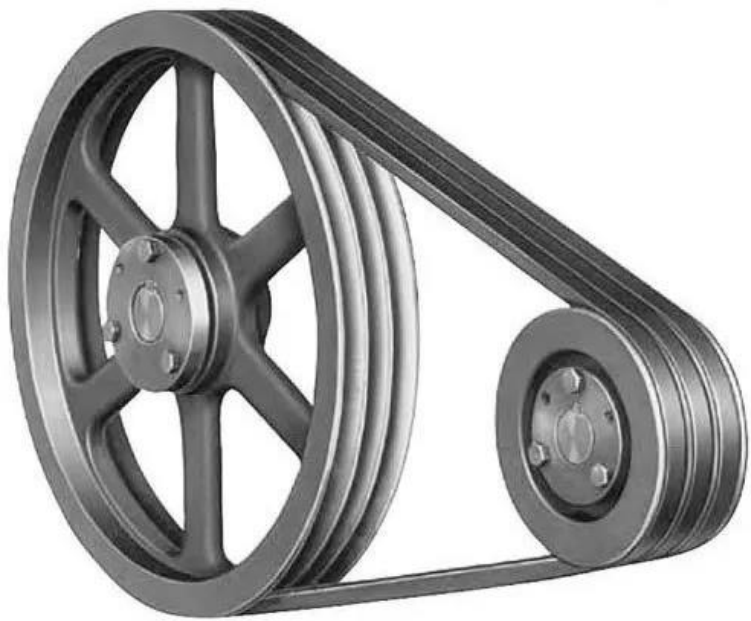
Utilização de elementos de transmissão flexíveis permite configurações de transmissão distintas

- Transmissão por correias
- Transmissão por cabos
- Transmissão por correntes



# CORREIAS

Transmissão de movimento de rotação entre veios com grande entre eixo

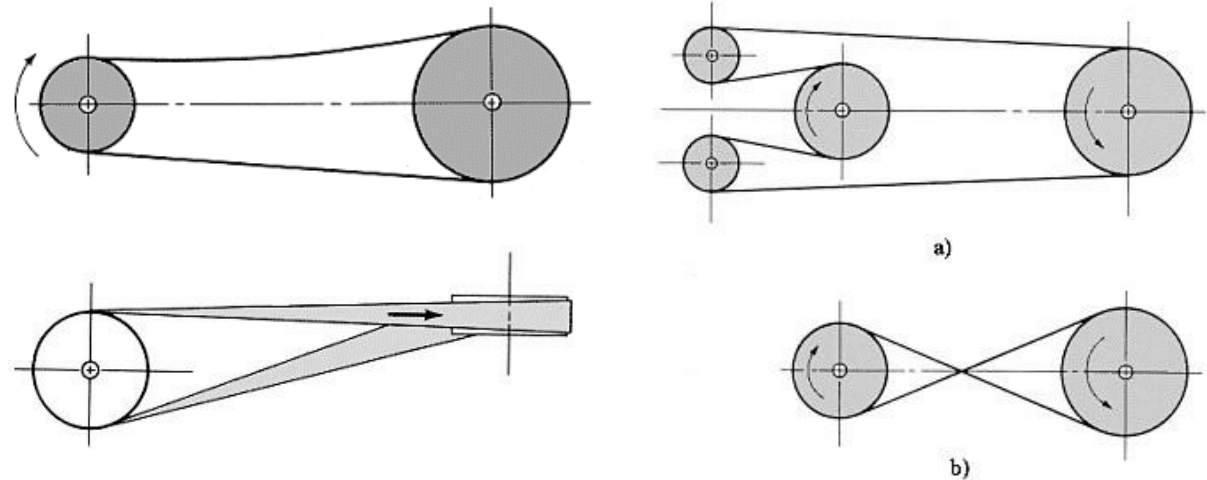
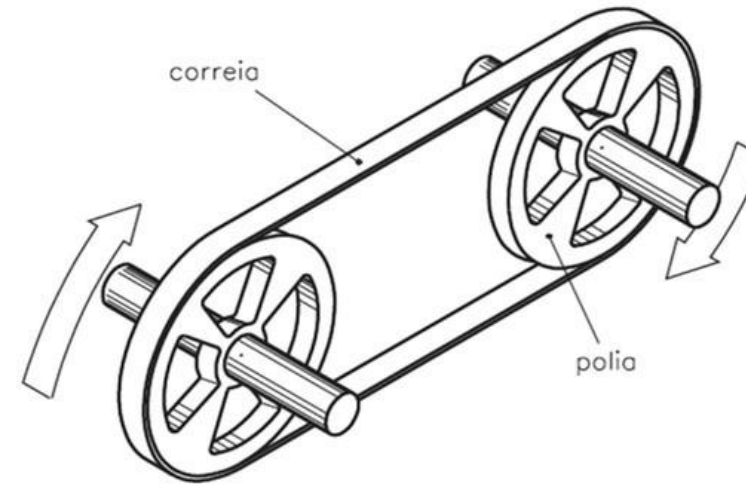


# CORREIAS


Entre eixo depende do comprimento da correia e diâmetro das rodas

Sentido de rotação depende da configuração da correia


Relação de transmissão depende do diâmetro das polias



# CORREIAS



Possibilidade de grandes distâncias de entre eixo  
Funcionamento silencioso  
Absorção de impactos  
Facilidade de manutenção – facilidade de substituição de componentes

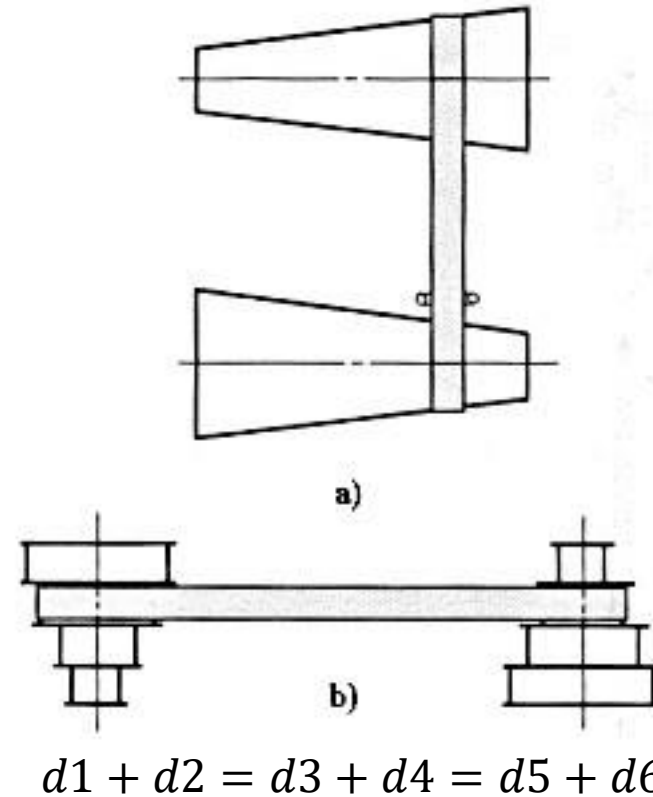


Possibilidade de escorregamento (expeto com correias dentadas)  
Duração de vida mais curta

# TRANSMISSÃO POR CORREIAS

Transmissão caracterizada por:

- Diâmetro da roda motora:  $d$
- Diâmetro da roda movida:  $D$
- Coeficiente de escorregamento:  $g$ 
  - 3 a 5% em correias planas e trapezoidais, 0% em correias dentadas
- Transmissão:  $i = \frac{d \cdot (1 - g)}{D}$



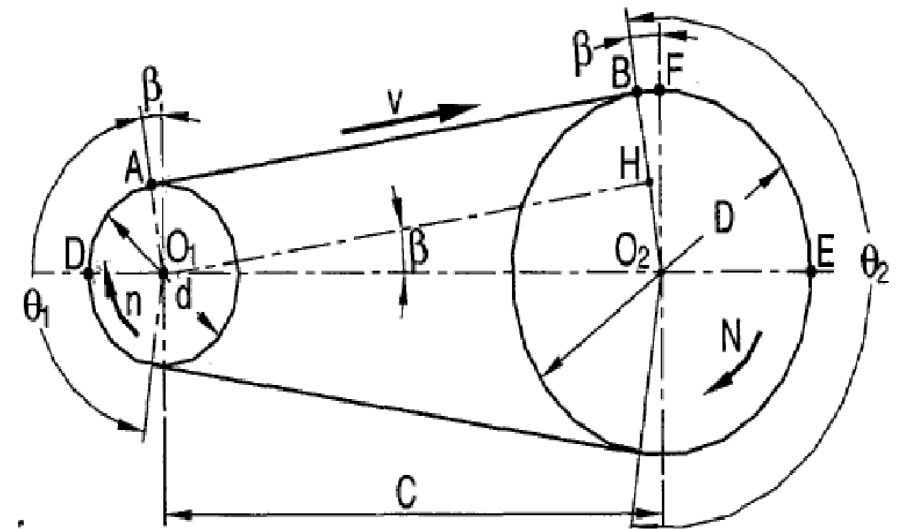
# TRANSMISSÃO POR CORREIAS

## Comprimento da correia:

- Diâmetro da roda motora:  $d$
- Diâmetro da roda movida:  $D$
- Distância de entre eixo:  $C$
- Ângulo de contacto da polia motora:  $\theta_1 = 2 \arccos \left( \frac{D-d}{2.C} \right)$

- Comprimento da correia:

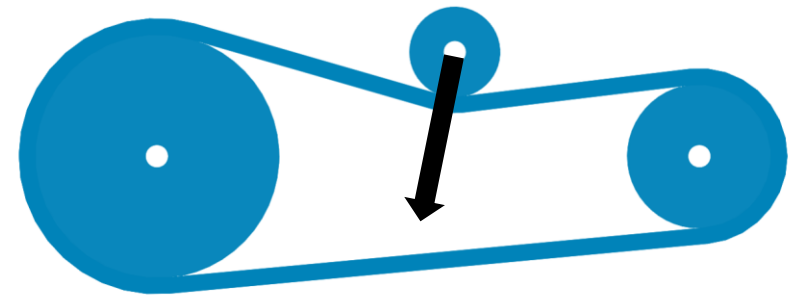
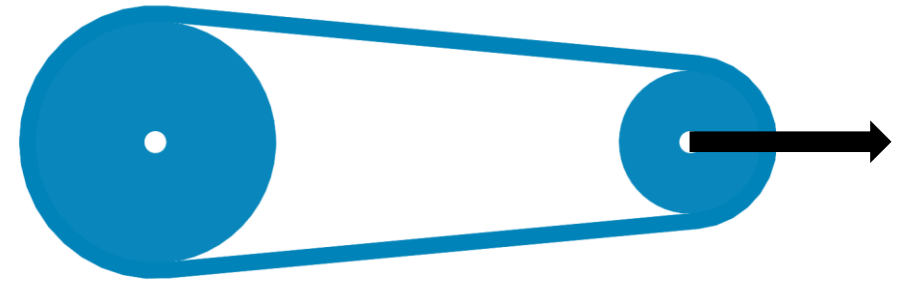
$$L = \frac{\pi}{2}(d + D) + 2.C.\sin\left(\frac{\theta_1}{2}\right) + \frac{\pi}{2}\left(1 - \frac{\theta_1}{\pi}\right)(D - d)$$



# TRANSMISSÃO POR CORREIAS

## Tensionamento da correia:

- Pré tensão: Tensão necessária a garantir o atrito necessário à transmissão
- Possibilidade de entre eixo variável
- Possibilidade de adequar um comprimento de correia maior a um entre eixo pretendido



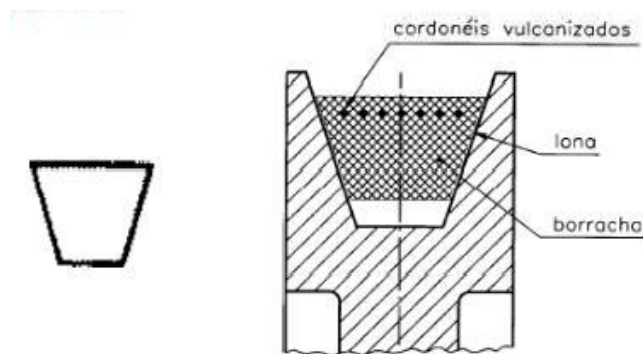


# CORREIAS

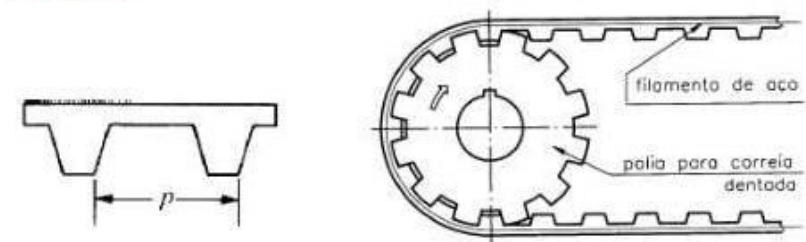
Plana



Trapezoidal



Dentada  
(síncrona)



# CORREIAS PLANAS

Velocidade de translação da correia até 90m/s

Vida útil até 40.000 horas de trabalho











Permitem transmissão entre veios não paralelos

Permitem grandes distâncias de entre eixo

Utilizam polias de grandes dimensões

Permitem relações de transmissão até 1:20



|   |   |                                  |
|---|---|----------------------------------|
|    |    | polia de aro plano               |
|    |    | polia de aro abaulado            |
|   |   | polia escalonada de aro plano    |
|  |  | polia escalonada de aro abaulado |
|  |  | polia com guia                   |

# CORREIAS TRAPEZOIDAIS

Velocidade de translação da correia até 25m/s

Vida útil até 10.000 horas de trabalho

Permitem transmissão entre veios paralelos

Permitem distâncias de entre eixo mais curtas

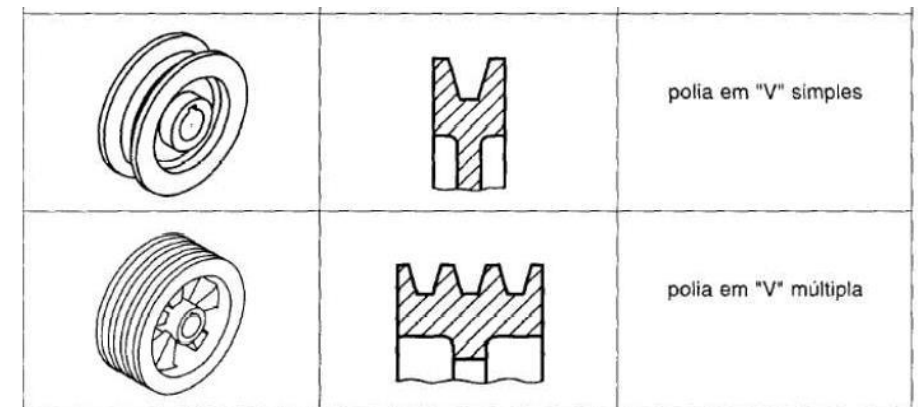
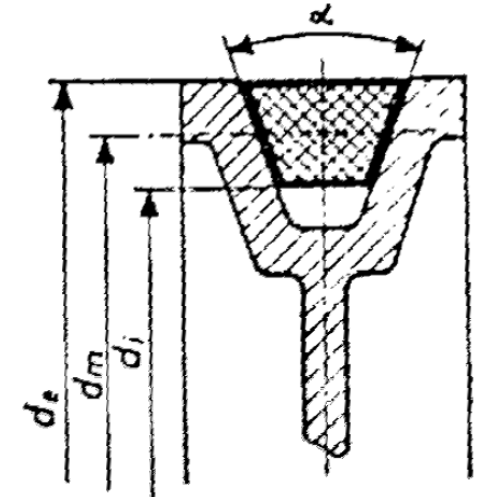
Utilizam polias de menores dimensões

Permitem relações de transmissão até 1:5

Menor tensão de montagem

Mais flexíveis e mais resistentes que as correias planas

Rendimento superior: escorregamento mínimo ou nulo



# CORREIAS DENTADAS (SÍNCRONAS)

Transmissão de movimento com necessidade de sincronismo

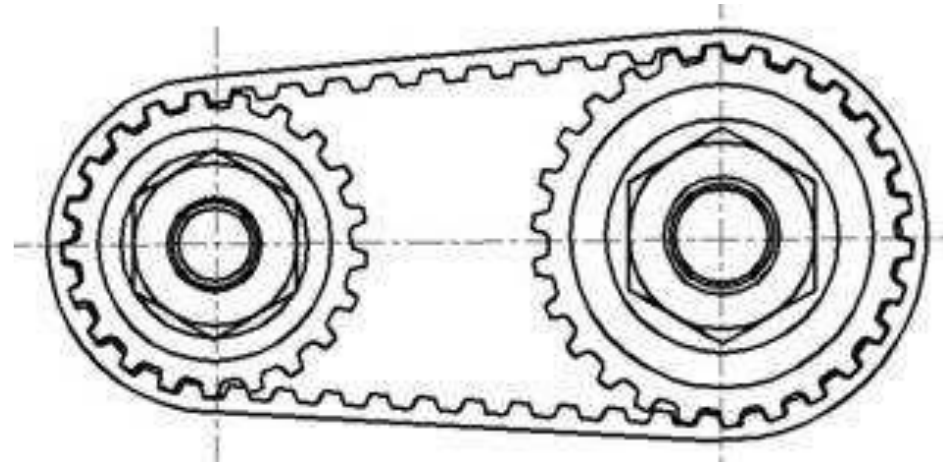
Potência e velocidade de transmissão inferior

Mais flexíveis que correias trapezoidais

Permitem polias mais pequenas - permitem montagens mais compactas

Relações de transmissão reduzidas

Permitem operação com velocidades baixas




# CORREIAS DENTADAS (SÍNCRONAS)

Transmissão de movimento de rotação de um eixo em movimento de translação de um carro



# TRANSMISSÃO POR FUSO



Possibilidade de movimento de translação de grande distância

Grande velocidade de translação

Baixa velocidade de rotação para grande velocidade de translação

Necessidade de grande binário de entrada

Menor precisão e repetibilidade

Necessidade de ajustar tensão no sistema




# CORRENTES

Transmissão de movimento de rotação entre veios com grande entre eixo para binários elevados





# CORRENTES



Transmissão entre múltiplas rodas eixos paralelos com binário superior ao suportado por correias

Transmissão sem possibilidade de escorregamento

Menor necessidade de ajuste de tensão

Transmissão mais ruidosa

Necessidade de lubrificação

Maior massa

# FIXAÇÃO DE COMPONENTES EM VEIOS



Eixo

Componente mecânico fixo ou móvel (rotação ou translação livre) que é sujeito principalmente a força de flexão



Veio ou Eixo-Arvore

Componente mecânico móvel que é sujeito a esforço de torção e esforço de flexão

# FIXAÇÃO DE COMPONENTES EM VEIOS

## Necessidade de acoplar veios

- Ligação entre veios de um motor e veios de um equipamentos

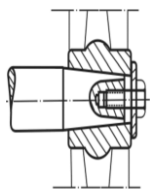
## Necessidade de prevenir movimento de translação de componentes ao longo de veios

- Garantir o posicionamento axial de componentes

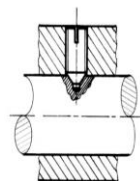
## Necessidade de prevenir movimento de rotação de componentes em torno de veios

- Garantir o posicionamento radial e angular de componentes

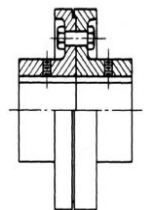
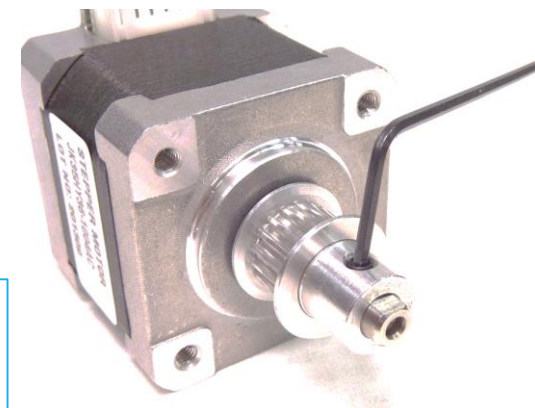
# ACOPLAMENTOS RÍGIDOS



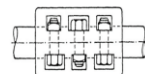
Acoplamento de peças a um eixo cónico ou por estrias



Acoplamento de peças a um eixo com aperto (com ou sem facejamento)



Acoplamento de eixos (ou peças) por flanges



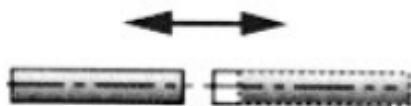
Acoplamento de eixos por ligações cilíndricas



# ACOPLAMENTOS PARA DESALINHAMENTOS

Acoplamento de veios ou de componentes a veios deve compensar possíveis desalinhamentos

desalinhamento axial



desalinhamento torcial



desalinhamento angular



desalinhamento lateral



# ACOPLAMENTOS PARA DESALINHAMENTOS



União lateral  
(oldham)



União móvel  
dentada  
(amerigear)



Junta universal  
(cardan)



Juntas flexíveis  
(Beam Couplings)



Juntas flexíveis  
(Double Loop  
Couplings)



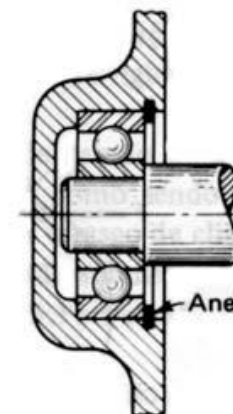
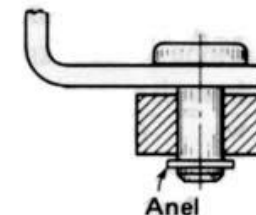
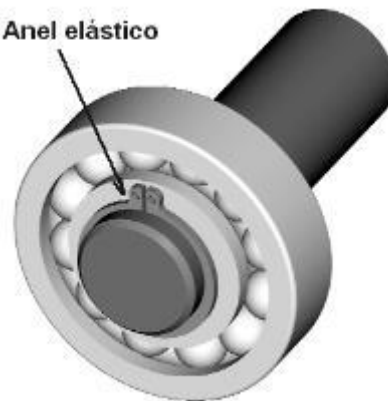
Juntas flexíveis (Jaw  
Couplings)

# FIXAÇÃO DE COMPONENTES EM VEIOS

Anéis elásticos (ou freios ou anéis de retenção) são utilizados para impedir o movimento axial de componentes ao longo de um veio ou de um furo



Anel elástico





# FIXAÇÃO DE COMPONENTES EM VEIOS

Chavetas são utilizadas para impedir o movimento de rotação de componentes num veio ou num furo

