

APOSTILA
do Prof. Eduardo

Projeto de Máquinas

Dimensionamento do sistema de transmissão de potência

Prof. Eduardo Furlan
2023



Sistema de transmissão

Sistema de transmissão de potência

- Objetivo: transmitir potência, torque ou rotação para os elementos que compõem uma máquina
- Sistema deve ter bom funcionamento e bom rendimento
 - Rendimento consiste na relação entre a energia convertida em trabalho e a energia total consumida
- Rotação transmite potência ocupando um espaço menor do que com o movimento de translação
- Um sistema de transmissão é um conjunto de elementos que é capaz de movimentar uma máquina
- Uma das fontes de alimentação das máquinas é o motor

- Potência é a quantidade de energia fornecida a uma fonte a cada unidade de tempo
- É a rapidez com que uma quantidade de energia é transformada em trabalho

$$\text{potência} \rightarrow P = \overset{\text{torque}}{T} \times \frac{d\theta}{dt} \leftarrow \text{ângulo de rotação}$$

$$\text{rotação} \rightarrow \omega = \frac{d\theta}{dt}$$

$$\text{potência} \quad P = \underset{\text{torque}}{T} \times \overset{\text{rotação}}{\omega}$$

Dimensionamento

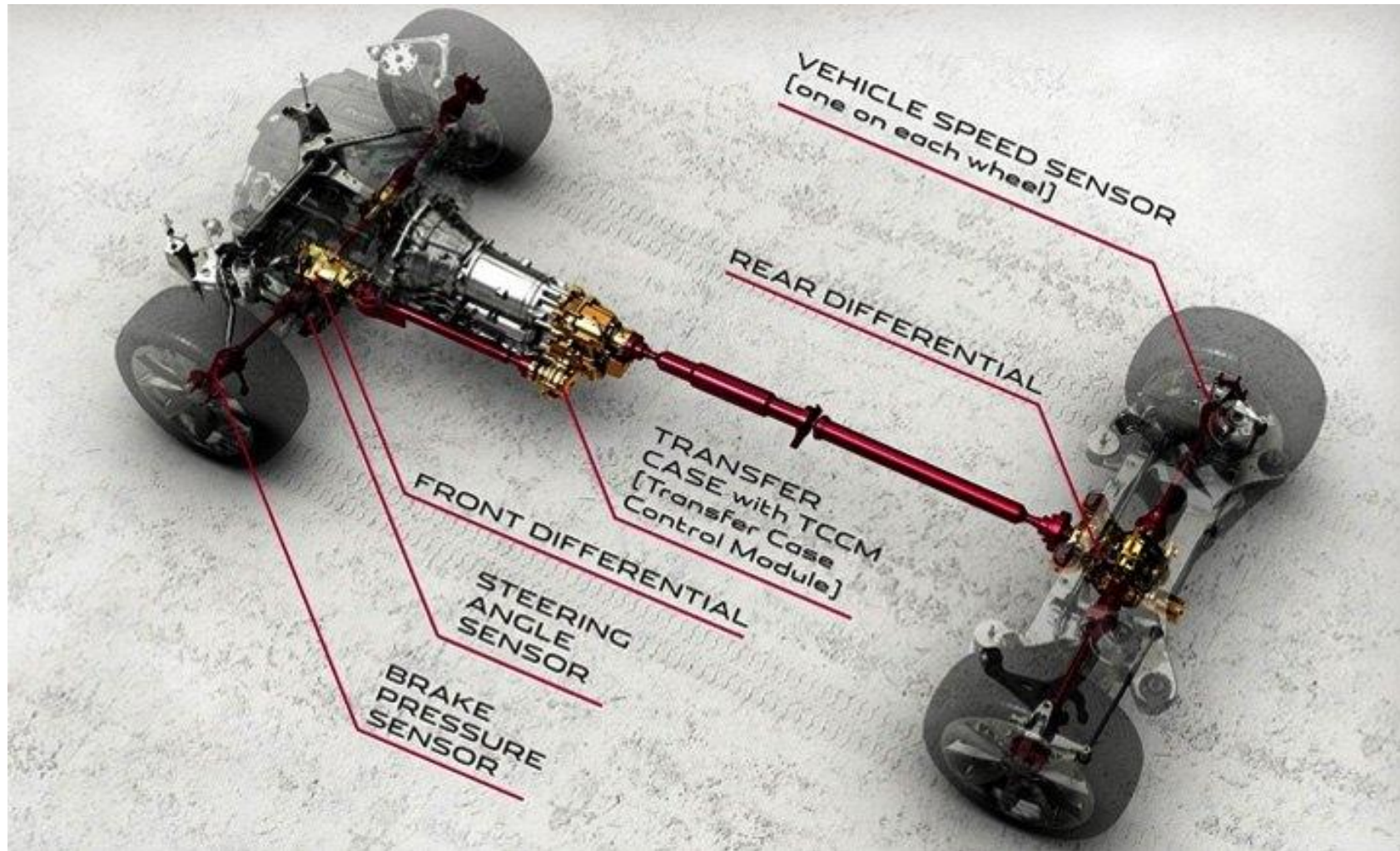
- Perda de potência
 - Dissipada em parte sob a forma de energia
 - Transformada em calor ou atrito entre os elementos
- Potência transformada em trabalho

Quadro 3.1 | Rendimento dos elementos de máquinas

Tipo de transmissão	Rendimento
Correia em V	$0,97 \leq \eta_c \leq 0,98$, onde η_c é o rendimento da correia em V
Engrenagens usinadas	$0,96 \leq \eta_e \leq 0,98$, onde η_e é o rendimento da engrenagem usinada
Rolamento (par)	$0,98 \leq \eta_m \leq 0,99$, onde η_m é o rendimento do par de rolamento

“Eta”

Eixo árvore



Eixo fixo



Fonte de potência

- Elemento que transmite uma quantidade de energia para um sistema
- **Eixos fixos** : são elementos fixos de máquina
 - Não são submetidos ao esforço de torção
 - Apenas suportam as rodas ou polias
- **Eixos árvores** : são elementos que giram para que a potência seja transmitida
- Eixos de transmissão são usados em praticamente todas as máquinas para transmitir torque ou rotação

- Eixos possuem basicamente dois tipos de cargas
 - Torção devido ao torque
 - Flexão devido às cargas transversais
- Potência transmitida por um eixo e sua rotação

potência instantânea → $P = 2\pi fT$ [kW]

torque

frequência de rotação

- Tensões no eixo

tensão de cisalhamento momento polar de inércia

torque → $T = \frac{\tau_{adm} \times J}{R}$

raio externo

raio interno

momento → $J = \frac{\pi R^4}{2}$

eixo maciço

momento → $J = \frac{\pi(R_o^4 - R_i^4)}{2}$

eixo tubular

Exemplo

- Eixo tubular
 - Diâmetro interno = 20 mm
 - Diâmetro externo = 40 mm
- Utilizado para transmitir 80 kW de potência
- Precisa ter uma rotação que não exceda a tensão de cisalhamento de 40 MPa
- Qual seria a frequência de rotação?

Solução

$$J = \frac{\pi(R_0^4 - R_i^4)}{2} \quad T = \frac{\tau_{adm} \times J}{R}$$

$$J = \frac{\pi \cdot (0,02^4 - 0,01^4)}{2} = 2,34 \times 10^{-7}$$

$$T = \frac{40 \times 10^6 \cdot 2,34 \times 10^{-7}}{0,02} = 468 \text{ Nm}$$

$$P = 2\pi fT$$

$$f = \frac{P}{2\pi T} = \frac{80 \times 10^3}{2 \pi 468} = 27,2 \text{ Hz}$$

Correias

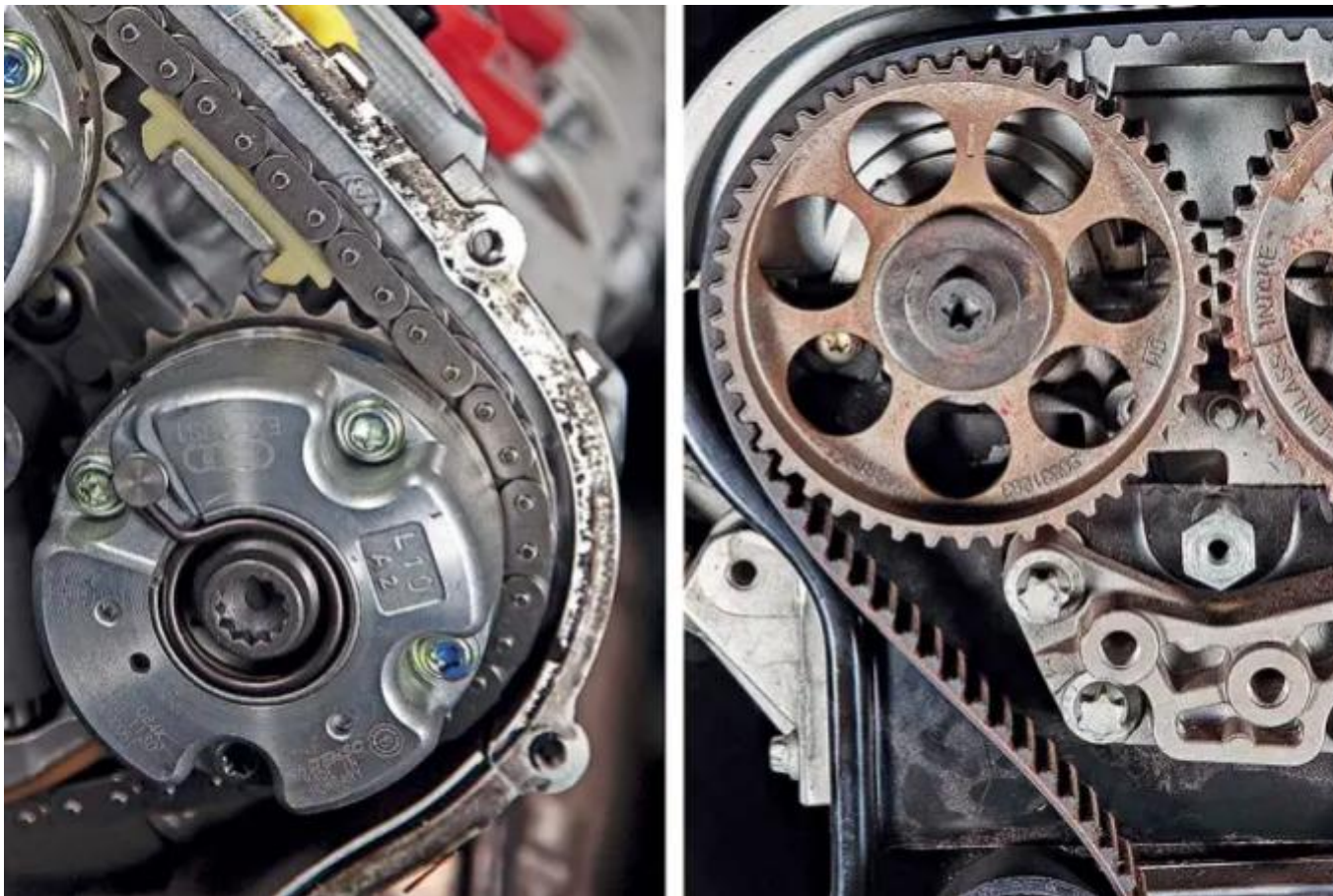
Correias



Fonte: mackflex.com.br

Hexagonal





Fonte: Quatro Rodas



Correias

- Elementos mais utilizados para transmissão de potência
- Anéis de material flexível que movimentam em torno de dois eixos
- Costumam ser utilizadas quando a transmissão é entre dois eixos que possuem uma certa distância entre si
- Podem ser planas, dentadas ou trapezoidais

- Planas e trapezoidais são mais utilizadas em compressores de ar-condicionado, bombas d'água e motores automotivos
- Dentadas são utilizadas em conjuntos de engrenagens para transmissão de potência
- Planas geralmente são fabricadas em couro, borracha, lona ou mistas

- Trapezoidais são fabricadas em borracha com fibras internas, pois precisam resistir mais à tração
- Dentadas são fabricadas com borrachas e fibras
 - São utilizadas em conjuntos onde não haverá deslizamentos, como a correia do alternador de um automóvel ou a correia dentada do comando de válvula

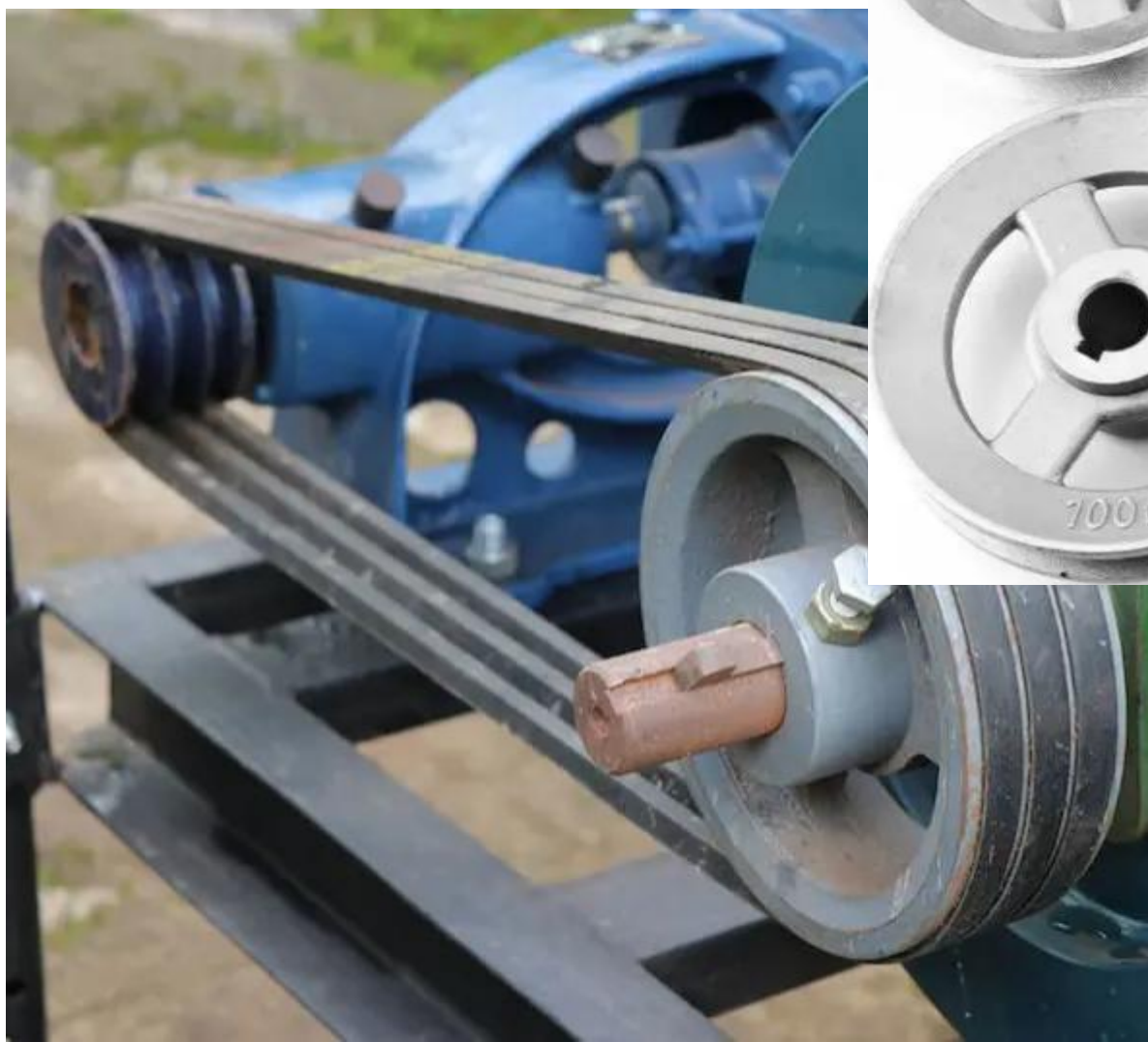
- As planas podem transmitir grande quantidade de energia
- As em V são as mais utilizadas nos sistemas de transmissão de potência
- As trapezoidais possuem custos relativamente baixos
- As simples e múltiplas possuem um rendimento entre 0,96 e 0,98
- As hexagonais transmitem potência em dois lados

Quadro 3.2 | Especificações de cada tipo de correia

Valores máximos	Planas	Em V
Potência	1.600 kW	1.100 kW
Rotação	18.000 rpm	
Força tangencial	50 KN	
Velocidade tangencial	90 m/s	26 m/s
Distância centro a centro	12 m	
Relação de transmissão ideal	1:5	1:8
Relação máxima de transmissão	1:10	1:15

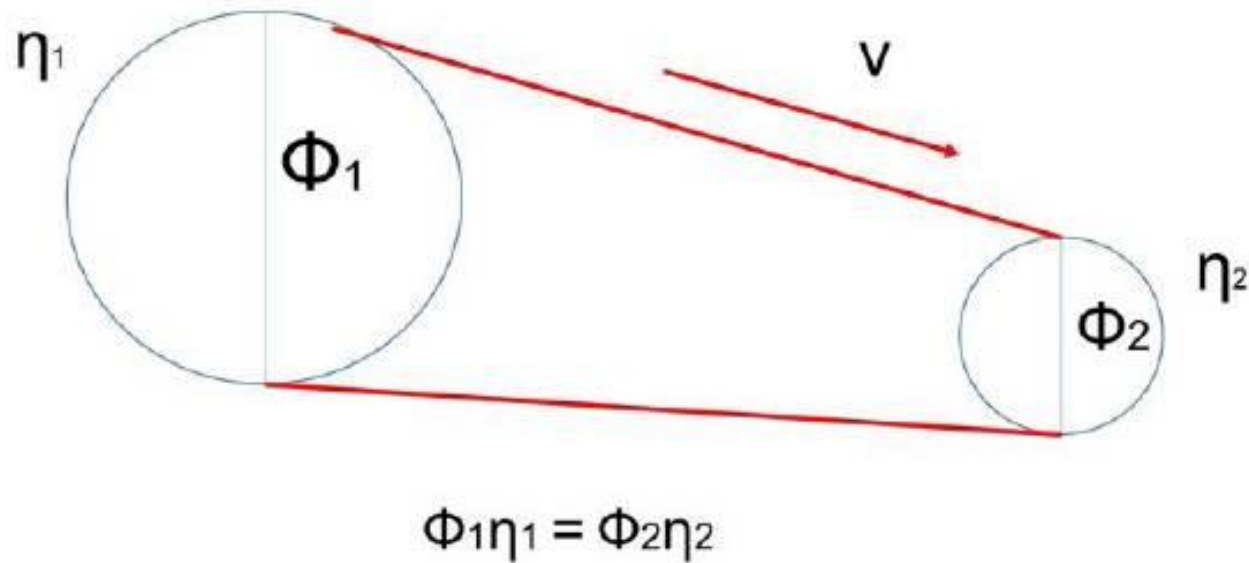
Polias

Polias

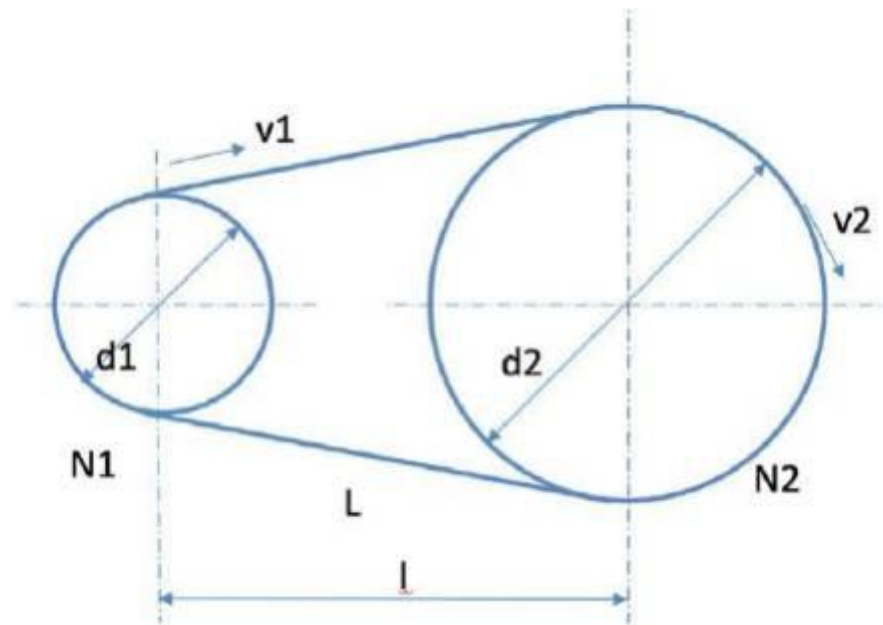


Fontes: fractory.com e
goldstartool.com

Polias



- Formam um par cinemático (que se movimenta)
- Unidas por uma correia



$$v_1 = v_2 \quad \pi d_1 \times n_1 = \pi d_2 \times n_2$$

$$d_1 \times n_1 = d_2 \times n_2 \quad \frac{n_1}{n_2} = \frac{d_2}{d_1}$$

Engrenagens

- São elementos classificados pela sua forma construtiva, que define a sua aplicação
- Existem engrenagens cilíndricas, helicoidais, cônicas e tipo parafuso sem-fim



Transmissão por atrito

Sistema de transmissão de um 1913 Metz "22" Roadster



Transmissão por atrito

- Parecido com a transmissão por engrenagens
- Há semelhança com o espaço, com os tipos e arranjos entre árvores e sentido de rotação
- Transmissão é realizada por deslizamento
- Similar a transmissão por correias (as que permitem deslizamento)

- Deslizamento ocorre em função do torque transmitido e pela pressão de contato
- Não é muito utilizado, sendo recomendado para velocidades tangenciais de até 20 m/s e de eficiência entre 95 a 98%
- Um exemplo desse tipo de transmissão é a embreagem de fricção
 - Utiliza o princípio de atrito entre dois discos e com isso transmite a rotação para as rodas



Cálculo cinemático

- **Cinemático** (movimento) : relacionado com as características do movimento
- De uma perspectiva espacial e temporal
- Sem referência com a força causadora do movimento
- Descreve o movimento para determinar qual a velocidade do objeto e qual a altura e a distância que o objeto atinge

- Um par cinemático é composto de dois elementos ligados entre si, podendo a **vinculação** entre eles ser
 - Um ponto: por exemplo, o dente de engrenamento das engrenagens
 - Um elemento flexível: por exemplo, as correias
 - Uma articulação: por exemplo, a rótula entre a biela e a manivela, que é o mancal
 - Um deslizamento: por exemplo, o êmbolo de um pistão e sua camisa

- A análise cinemática verifica:
 - Características dos movimentos do objeto
 - Características físicas
 - Tempo
- É possível calcular a relação de transmissão pela análise cinemática do mecanismo

Cálculo cinético

- **Cinético** (forças) : examina as forças que agem sobre um sistema
- Define as forças que provocam o movimento
 - Por meio dessa análise é possível avaliar as características do movimento de uma carga
- A cadeia cinemática ou sistema é composta do conjunto dos vários elementos ligados entre si

A análise cinética verifica:

- As forças que são necessárias para que os movimentos sejam executados

Exemplo

- Motor que possui uma polia de 150 mm de diâmetro que gira a 750 rpm para mover um eixo de transmissão, cuja polia tem 300 mm de diâmetro

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{d_2}{d_1}$$


$$d_1 = 150mm$$

$$d_2 = 300mm$$

$$n_1 = 750rpm$$

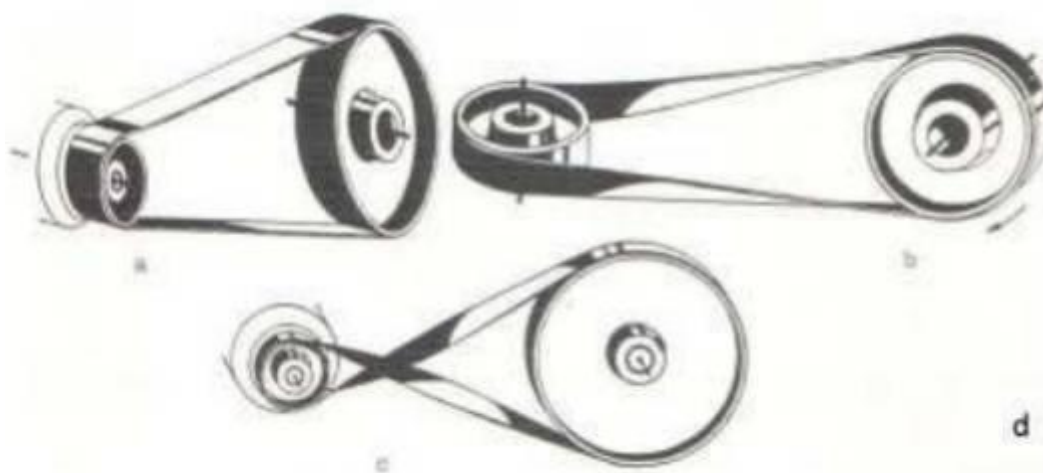
$$n_2 = \frac{d_1 \times n_1}{d_2} = \frac{150 \times 750}{300} = 375rpm$$

Forças de atrito e contato

- A transmissão de potência de um eixo a outro é a
 - Transmissão de força
 - Transmissão de velocidade
- Essa transmissão é realizada por mecanismo
- Os mecanismos podem ser classificados em
 - Classes
 - Gêneros

Transmissão por contato direto

- Acopla uma fonte de potência à máquina a ser movida de forma direta
- Também pode ser realizado por correias onde o movimento é no mesmo sentido entre a polia motora e a movida



- Essas transmissões são de simples construção e também são silenciosas
- Têm capacidade de absorver choques e, como todas as transmissões, geram algumas perdas por atritos
- As perdas são representadas pelo rendimento da transmissão ou eficiência (E_f)

Transmissão por contato indireto

- Intermediários rígidos. Ex.:
 - Biela
 - Eixo cardã
- Intermediários flexíveis. Ex.:
 - Correias
 - Cabos
 - Correntes

Exemplo

- Motor
 - Torque de 40 kgf.m
 - Rotação máxima de 2.400 rpm
- Qual será o melhor sistema de transmissão para esse tipo de equipamento?
- Qual é a potência que será transmitida?
- Quais são as especificações dos elementos de transmissão?
- Qual tipo de transmissão deve ser utilizado por força de atrito e de contato?

- O primeiro passo é calcular a potência necessária
 - A fim de saber qual elemento escolher

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

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

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

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

- Será escolhida a transmissão por correias, já que são as mais utilizadas
- Teremos um sistema de transmissão por força de atrito
 - Onde a transmissão é realizada por deslizamento
- Se o eixo for tubular e possuir um diâmetro externo de 40 mm e um diâmetro interno de 20 mm, calculamos também a tensão de cisalhamento e a frequência

$$J = \frac{\pi(R_0^4 - R_i^4)}{2}$$

$$T = \frac{\tau_{adm} \times J}{R}$$

$$J = \frac{\pi(R_0^4 - R_i^4)}{2}, \text{ para eixo tubular e } T = \frac{\tau_{adm} \times J}{R}$$

$$J = \frac{\pi(0,02^4 - 0,01^4)}{2} = 2,34 \times 10^{-7} m^4 \text{ e } 392 = \frac{\tau_{adm} \times 2,34 \times 10^{-7}}{0,02}$$

$$\tau_{adm} = 33.504.273 Pa = 33,5 MPa$$

$$f = \frac{P}{2\pi T} = \frac{98 \times 10^3}{2\pi \times 392} = 39,8 Hz$$

(similar ao slide 11)

- Outro ponto importante a ser considerado é o rendimento dessa transmissão
- Como foi escolhida a correia, temos que o rendimento ficará entre $0,97 \leq \eta_c \leq 0,98$, conforme o Quadro 3.1 (slide 4)
- A potência efetiva ficará entre 95,06 W e 96,04 W obtido de $(98 \cdot 0,97)$ e $(98 \cdot 0,98)$



slide 38

Exemplo

- Motor de um carro 1.0 turbo flex de três cilindros
- Potência de 128 cavalos a 5.500 rpm
- Eixo for maciço de 25 mm de diâmetro
- Calcular:
 - A frequência do motor
 - O torque
 - A tensão máxima de cisalhamento

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

- 1 cv é igual a 0,735499 kW

$$128 \times 0,735499 = \frac{T \times 2\pi \times 5.500}{60.000}$$

conversão de cv

$$T = 163,5 Nm$$

conversão
de rpm

- Tensão máxima de cisalhamento

$$T = \frac{\tau_{adm} \times J}{R}$$

$$J = \frac{\pi R^4}{2}, \text{ para eixo maciço}$$

$$J = \frac{\pi \times 0,0125^4}{2} = 3,83 \times 10^{-8}$$

$$163,5 = \frac{\tau_{adm} \times 3,83 \times 10^{-8}}{0,0125} = 53.292.714 Pa = 53,3 MPa$$

- Frequência do motor

$$f = \frac{P}{2\pi T} = \frac{128 \times 0,735499 \times 10^3}{2\pi \times 163,5} = 91,6 Hz$$

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

