

Resumo de Introdução a Sistemas Mecânicos

Patrick Sampaio
patrick.sampaio@usp.br
1º semestre de 2020

1 Tolerância

Tolerância é uma restrição de medida de uma grandeza física. O projetista impõe as restrições permitidas à seu projeto para que não prejudique o funcionamento, todavia é importante ter em mente que tolerâncias mais rígidas adicionam custos de fabricação.

Ajuste folgado. Ajuste em que não há interseção entre o intervalo de medidas do eixo e do furo

$$\begin{array}{cc} -0,025 & -0,01 \\ \text{Eixo : } 40,000 & \text{Furo : } 40,000 \\ -0,050 & -0,02 \end{array}$$

Neste tipo de ajuste, há movimento relativo entre o eixo e o furo, mas os hidrodinâmicos trabalham neste regime, havendo necessidade de lubrificação.

Ajuste Forçado. Eixo sempre possuirá raio maior que o tamanho do furo, o encaixe é feito de forma *forçada*:

$$\begin{array}{cc} -0,02 & -0,03 \\ \text{Eixo : } 40,000 & \text{Furo : } 40,000 \\ -0,01 & -0,04 \end{array}$$

Neste caso não há movimento relativo entre as peças, havendo transmissão de **momento torsor**. Onde quando se excede o momento torsor máximo, há movimento relativo.

Ajuste Incerto. Há regiões do intervalo de tolerância onde há interferência de valores, e há regiões onde não há interferência. Isto é, peças deste tipo de ajuste podem ser com **ajuste forçado** tanto como **ajuste folgado**

$$\begin{array}{cc} -0,04 & -0,03 \\ \text{Eixo : } 40,000 & \text{Furo : } 40,000 \\ -0,02 & -0,05 \end{array}$$

Semântica de Tolerância

Afastamento Superior: Diferença do valor da cota nominal e o limite superior da tolerância

Afastamento Inferior: Diferença do valor da cota nominal eo limite inferior da tolerância

Campo de tolerância: Diferença entre o *Afastamento Superior* e o *Afastamento Inferior*

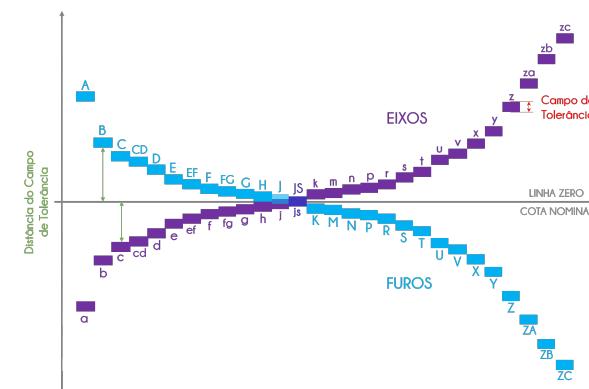
Unidade de tolerância: Valor numérico que serve para calcular tolerâncias de cenários específicos, esta intimamente ligada à **qualidade de trabalho**

Classe: Posição da *Qualidade* em relação a linha zero(cota nominal)

Qualidade de trabalho: Amplitude do intervalo de tolerância. Havendo alguns tipos indicados para diferentes tipos de aplicações

Campos de Tolerância

Campos de tolerâncias são desvios fundamentais que irão ditar o intervalo de medidas aceitáveis para uma determinada aplicação de uma peça. Onde estes desvios fundamentais são ilustrados na figura abaixo



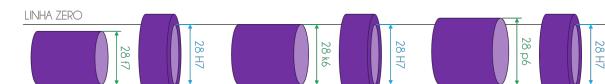
- Campos com letra maiúscula referem-se à furos
- Campos com letra minúscula referem-se à eixos
- O afastamento H e h possue afastamento inferior e superior, respectivamente, nulos, ou seja a cota nominal.

Como usar? Dado valores de medidas precisaremos classificá-los em tolerância ou dado em notação de tolerância precisaremos encontrar afastamento superior e inferior.

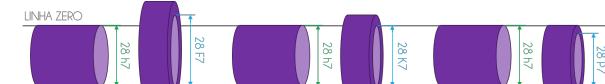
- Dado a tolerância e o diâmetro nominal da peça, descobrir a amplitude do intervalo de medidas na tabela 1.
- Identificar o campo de tolerância da medida na figura 1, isto irá dar o desvio mínimo se for um furo ou desvio máximo de for um eixo.

Sistema Base

Sistema furo-base. Neste sistema, mantém-se constante a medida do furo, e para obter os ajustes **forçado**, **incerto**, **folgado**, altera-se a tolerância do eixo. Portanto a linha da cota nominal refere-se a cota nominal do furo.



Sistema eixo-base. Neste sistema, mantém-se constante a tolerância do eixo, e para obter o ajuste desejado altera-se a tolerância do furo, a linha de zero refere-se a cota nominal do eixo.



2 Tolerância Dimensional e Geométrica

Em muitas aplicações mecânicas, não basta apenas a tolerância dimensional, mas também tolerância geométrica para que determinada peça possa cumprir a sua respectiva tarefa, e além disso, também há tolerâncias posicionais na equação.

	Tolerância	Símbolo
Forma	Retilinéide	—
	Planeza	□
	Circularidade	○
	Cilindricidade	○○
	Forma de um perfil qualquer	○○○
Posição	Forma de uma superfície qualquer	○○○○
	Paralelismo	//
	Perpendicularismo	⊥
	Inclinação	∠
	Localização de um ponto	⊕
Composto	Concentricidade e coaxialidade	◎
	Simetria	◎◎
Composto	Balida	↗

Relógio Comparador

Ferramenta que será utilizada em diversas medidas de tolerância, logo é essencial sabermos a sua cara

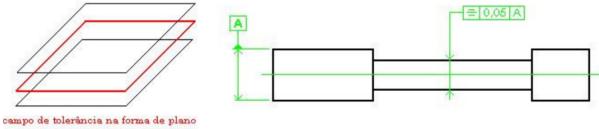


É importante zerar o relógio antes de tirar qualquer medida quando ele for colocado sobre a superfície à qual serão tiradas as medidas.

Também existem relógios comparadores digitais, mas os que eu já vi na poli eram mecânicos como o acima

Posição

Simetria. É a medida que restringe a linha de centro de uma peça a dois planos teóricos separados, cuja separação dos planos é a tolerância de simetria

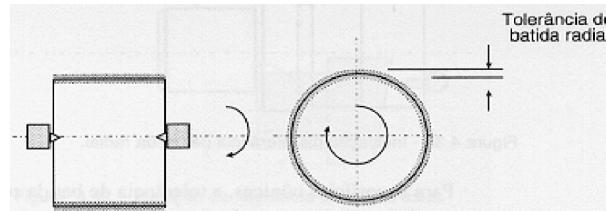


Como realizar a medida: Mede-se através do **desempeno**, que é colocado sobre uma das faces e zerado, após zera-lo, remove-se a peça e coloca-se invertida no desempeno, a variação do relógio do desempeno corresponde ao erro de simetria.

Batida

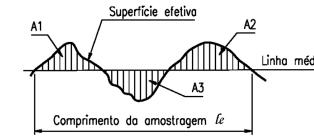
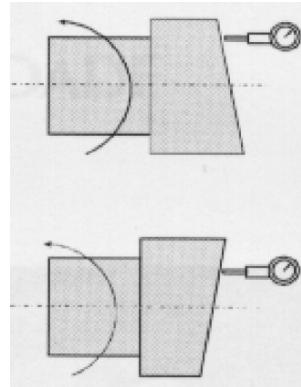
Batida Radial. A Batida Radial é medida através de um relógio apalpador encostado em uma superfície cilíndrica que é rotacionada por completo. A variação apresentada no relógio corresponde à medida da tolerância, sendo assim, ao fixarmos uma tolerância de batida radial estamos fixando essa variação que o relógio pode ter ao apalpar a superfície.

É importante comentar que esta medida não só é uma tolerância de Forma, mas também uma tolerância de Posição, pois tangencia medidas como a cilindricidade e a coaxialidade.



É importante deixar explícito que esta medida apenas faz sentido para peças de revolução.

Batida Axial. Já a Batida Axial, mede variações ao longo do eixo de uma peça, portanto ao invés de apalpar radialmente a peça, o relógio comparador é posicionado ao longo do eixo da peça, que ao rotacionar irá gerar perturbações no relógio, onde a tolerância de **batida axial** é o máximo que este relógio pode variar durante a rotação.



A média corresponde a área hachurada na figura acima

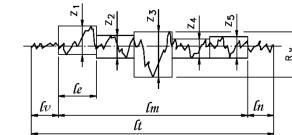
Rugosidade Máxima. Maior delta entre pico e vale sucessivo, isto é, mede a maior deterioração na peça no intervalo

Qualidade:

- Excelente medida para detectar falhas locais.

Defeitos:

- Não é representativo do perfil inteiro
- Equipamento específico para realização da medida

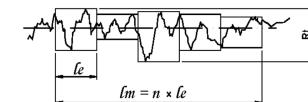


Desvio Aritmético Quadrático(RMS).

$$Rq = \sqrt{\frac{y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_n^2}{n}}$$

Rugosidade Total. Maior amplitude entre pico e vale de um perfil da peça inteira no intervalo avaliado.

$$l_m = n \times l_e$$



Para informações sobre notação, checar o apêndice.

4 União por Rebites

Características Gerais

Dispositivo feito para junção de duas peças através da inserção de um pino. O principal regime de esforço ao qual a junção será exposta, é um **regime de cisalhamento**

Cálculo dimensional de união rebitada.

$$\tau_{rebite} = \frac{F_r}{\pi d_{ri}^2} \leq \tau_{admissivel}$$

- O material do rebite geral é alumínio
- Uniões rebitadas devem ser feitas com folga entre o furo e o eixo do rebite.

Qualidade

- Equipamento altamente disponível

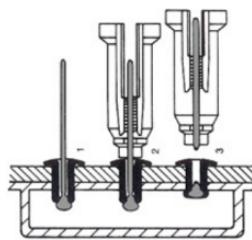
Defeitos

- Não descreve o perfil de maneira representativa pelo fato de ser a média, não detecta mudanças bruscas.

•

Tipos de rebites

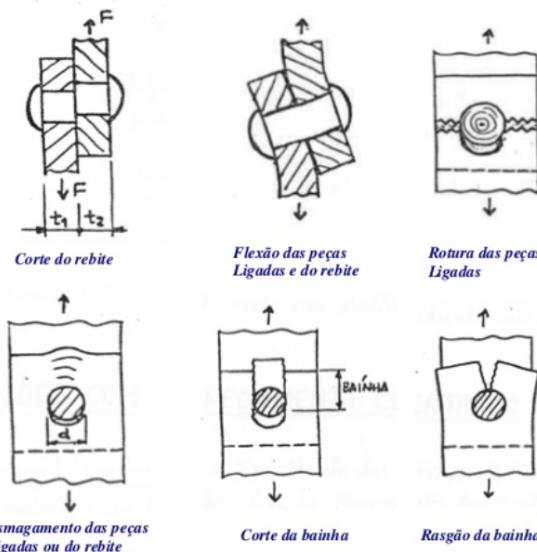
Rebite Pop. Fixação através da deformação realizada ao puxar a cabeça inferior do rebite, nessa deformação a força irá quebrar o corpo do rebite, fixando-o. Um de seus problemas é ele não ser macio.



Tipo de União

- **A Frio:** Utilizado em rebites de pequeno diâmetro, requer pouca ferramenta.
- **A Quente:** Utilizado em rebites de grandes diâmetros, adiciona uma tensão de compressão extra devido ao resfriamento que aumenta a resistência ao cisalhamento da união.

Falhas nos Rebites



- **Corte de Rebite:** União rebitada foi exposta a uma carga superior à dimensionada no projeto.

Como Evitar? Aumento do Fator de Segurança do projeto.

Vantagens da União Rebitada

- Preço
- Alta resistência da união
- Não é necessário mão de obra para execução da união.
- Descontinuidade estrutural gerada pelo furo, impede a propagação de trincas entre as peças.

Desvantagens da União Rebitada

- Peso da estrutura mais elevado devida a adição de elementos
- Necessidade de furação das partes
- Introdução de pontos de aumento de tensão.

5 Solda

União que consiste no derretimento de materiais para a realização da união, podendo ou não haver metal adicionado. Neste tipo de união fatores como tensões residuais, trincas são importantes.

Fusão do material de enchimento

Neste tipo de solda, o material de enchimento possui uma temperatura de fusão inferior ao material base.

- **Brazagem(brazing):** Material de enchimento apresenta $T_{fuso} > 450^{\circ}\text{C}$.
- **Solda Fraca(soldering):** Material de enchimento apresenta $T_{fuso} < 450^{\circ}\text{C}$.

Geralmente o material de enchimento para este tipo de solda é o estanho ou prata.

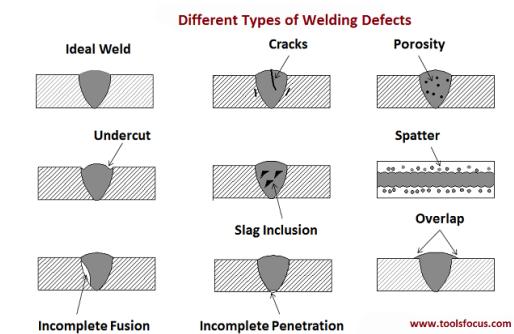
Fusão do material de enchimento e do base

- **Soldagem à gas:** Utiliza o calor de uma combustão à gas como fonte de calor
- **Soldagem a arco-elétrico:** Proteção é feita pelo revestimento do eletrodo, que ao se gaseficar irá proteger a região fundida para não oxidar. Há formação de escória, uma camada protetora de sais que não se mistura com a poça fundida. É um dos mais utilizados na indústria, cerca de 50pct das soldagens de manu-tenção utilizam este processo.
- **MIG(Metal Inertial Gás):** Utiliza um arco elétrico com soma de um gás inerte que sai da tocha protegendo a poça de oxidação. Altamente Automatizável.
- **TIG(Tungstein Inertial Gás):** Mesma lógica do MIG, mudando apenas a adição de material de adição por fora, eletrodo de tungstênio não é consumível.

Fusão do Material base

Apenas material que compõem as partes a serem unidas são utilizados. A fonte de calor para este processo é alguma fonte altamente concentrada, como *feixe de elétrons* ou *raio laser*. Altamente automatizável e possui como vantagem não adicionar peso à estrutura.

Problemas da soldagem



Muitos dos problemas associados a soldagem estão relacionados à habilidade de operação de quem faz a solda, uma mesma técnica aplicada com diferente qualidade operacional resulta em junções extremamente diferentes em termos de qualidade nas características. Isto posto, elencaremos alguns possíveis problemas:

- **Trincas:** Defeito grave, sobretudo trincas internas, associado à técnica, geralmente é gerado por movimentos bruscos durante a operação de soldagem.
- **Impurezas:** Defeito associado a junção de elementos de escória à junção, problema associado tanto à falta de limpeza do equipamento quanto à habilidade do operador. Há técnicas para remover escória, por exemplo: A cada cordão aplicado, passar uma escova de aço na junção para remoção das impurezas
- **Porosidade:** Defeito associado a soldagem muito rápida, causa enfraquecimento mecânico da junção
- **Cavidades**
- **Fusão Imcompleta**

Vantagens da soldagem

- Menor peso adicionado em relação a outros métodos de união.
- Não há limitação da espessura das partes à serem unidas.
- Automatizável em certos casos
- Aumento da eficiência mecânica?
- Menor tempo de fabricação?

Desvantagens da soldagem

- Habilidade do operador possui grande influência nas características da união
- Necessita de controle de qualidade rigoroso
- Tensões térmicas devido ao resfriamento não uniforme podem reduzir a eficiência mecânica da união

6 Adesivos

Fixação por adesivos consiste na união de peças através de interações de *Van de Waals*, portanto forças intermoleculares. Neste processo há **tempo de cure** da união, portanto um fator a ficar atento, além de que exige-se que as superfícies a serem adesivadas sejam preparadas para haver aderência e durabilidade da cola.

Processos de Cura

Algumas maneiras de se realizar a cura do processo.

- Reação Anaeróbica, isto é, privação de O_2
- Exposição ao Calor
- Luz UV

Preparação da Superfície

Algumas medidas precisam ser tomadas para a preparação de uma superfície para adesivagem

- Rugosidade $R_a < 3,5\mu m$
- Remoção de partículas soltas
- Desengraxamento
- Ataque químico para formação de cavidades para aumentar aderência

Carga

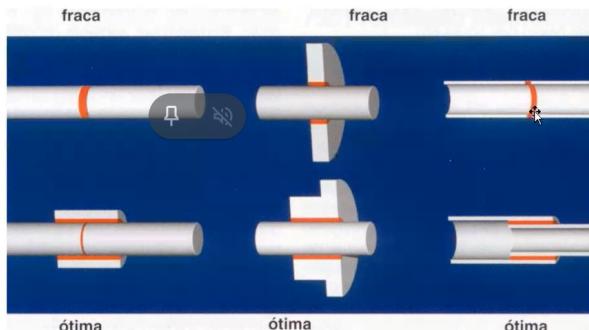
A união por adesivagem trabalha com **tensões de cisalhamento**.

A Equação de tensão é definida como

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Portanto é interessante a maior área possível, de forma que a tensão irá se distribuir ao longo da área reduzindo a chance de falha.

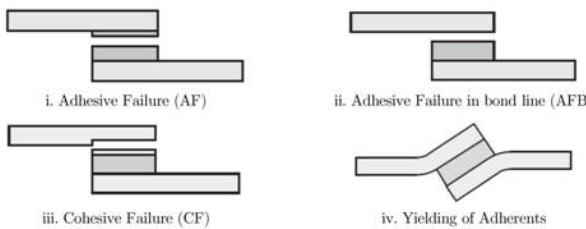
A escolha do tipo de cola deve levar em consideração a sua tensão de **cisalhamento máxima** e as temperaturas de operação.



Modos de Falha

A maioria dos modos de falha estão associado a

- Carga Aplicada superior a tensão de cisalhamento que a junção aguenta
- Carga Aplicada superior a tensão de cisalhamento que as peças unidas aguentam
- Também há modos de falha associados ao envelhecimento da junção causado pelo calor



Vantagens

- Não adiciona peso à estrutura
- Baixo custo
- Automatizável
- Não há alteração estrutural nas peças
- Distribuição uniforme de tensões

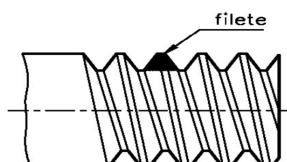
Desvantagens

- Necessidade de preparação da superfície
- Processo de cura adicionado à linha de fabricação da estrutura
- Não resiste a temperatura, ocorre envelhecimento pelo calor

7 Elementos Rosqueados

Forma de união que consiste na utilização do atrito para prender duas peças, onde há um parafuso que se encaixa em um furo rosqueado. Sistema amplamente utilizado e muito versátil.

Rosca. A definição de Rosca é o conjunto de filetes de um elemento.



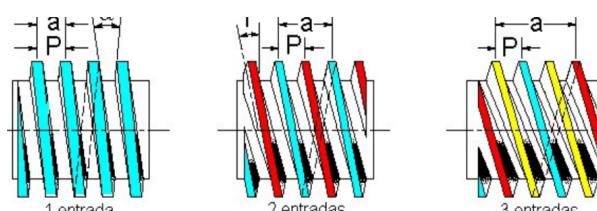
Onde este filete há algumas características importantes, como o tamanho, o espaçamento e o avanço.

Passo. Distância entre mesmos pontos de filetes consecutivos

Avanço. Distância percorrida axialmente por uma rotação completa do parafuso

Angulo de Avanço. Angulo entre o filete e o plano perpendicular à normal do eixo do parafuso

Avanço. $Avanço = Número\ de\ entradas * Passo$



Nomenclatura

- **M10:** Rosca métrica de diâmetro nominal 10mm e passo normal
- **M10x0,75:** Diâmetro nominal 10mm e passo fino de 0,75mm
- **M10x25:** Diâmetro nominal 10mm, passo normal com 25mm de comprimento
- **M10x0,75x25:** Diâmetro nominal 10mm, passo fino de 0,75mm e 25mm de comprimento

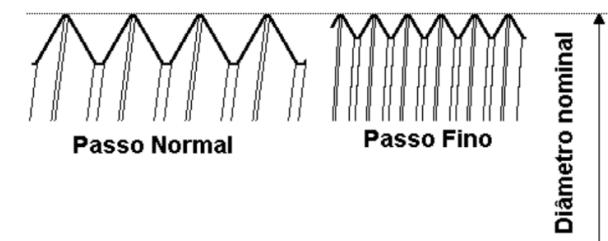
Portanto temos que:

$$Nomenclatura = Diâmetro_{nominal} X Passo X Comprimento$$

Passo Fino X Passo Normal

Aspectos da rosca de passo fino

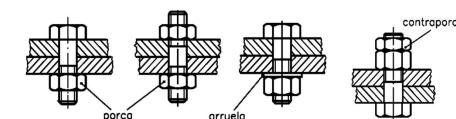
- Maior aperto devido à maior área de contato
- Maior precisão no ajuste
- Menor avanço por rotação



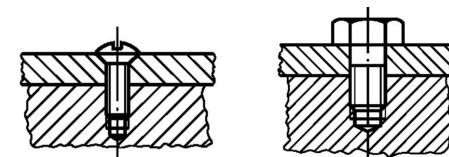
Uniões Parafusadas

As dimensões de um parafuso, para dado um diâmetro podem ser consultadas na tabela nos apêndices.

Parafusos Passantes. Parafuso atravessa as duas peças à serem unidas, sendo necessário adição de porcas e arruelas para prender as duas peças.



Parafusos Não-Passantes. Uniões não passantes são uniões que envolvem a furação das peças a serem unidas e fazer um furo rosqueado para rosquear o parafuso



Esta união é mais complicada de ser feita, pois envolve fazer um furo menor que o diâmetro do parafuso e a aplicação de um conjunto de machos para fazer a rosca no furo

Cargas

- **Tração:** Carga de trabalho dos parafusos rosqueados
- **Cisalhamento:** Carga de trabalho dos parafusos de corpo liso

Modos de Falha

A maioria dos modos de falhas estão associados à

- Dimensionamento do diâmetro do parafuso com baixo fator de segurança
- Falha devido à concentração de tensão gerada pelos furos

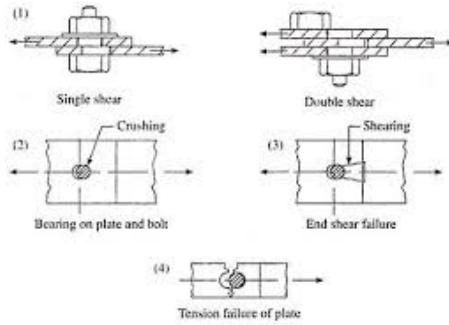


Fig. 4.17 Failure modes of bolted joints

Vantagens

- Totalmente Desmontável
- Peças amplamente disponíveis e consolidadas
- Não há necessidade de mão de obra qualificada
- Ajuste do aperto entre as peças

Desvantagens

- Enfraquecimento das peças pela introdução de descontinuidade na peça pelo furo
- Adição de custos pelos elementos rosqueados
- Concentração de tensão nos últimos filetes da rosca
- Susceptível a vibrações

8 Mancais

Mancais é um elemento de máquina que é utilizado para apoiar eixos que devem possuir restrição de movimentos, sendo uma restrição axial, ou uma restrição radial.

Uma das possíveis classificações de mancais que podem ser feitas, é pelo seu método de lubrificação

Mancais de Deslizamento à Óleo

Neste mancal ocorre movimento relativo entre o eixo e o mancal, de maneira que a velocidade de contato é diferente de 0.

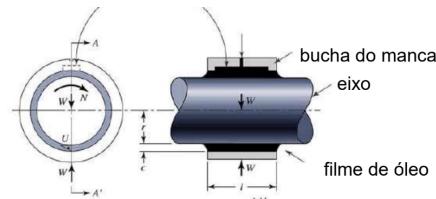
- Mancal mais simples
- Baixo custo
- Alto custo benefício

Propriedades Lubrificantes

- Evitar em contato entre as partes (reduzindo assim o desgaste por abrasão)
- Dissipar bem o calor
- Baixo risco ambiental
- Imune a variações de propriedades com a temperatura

Lei de Petroff

Equação importante para os fundamentos de **mancais hidrodinâmicos**. Esta lei determina o coeficiente de atrito de um lubrificante em função de alguns parâmetros do mancal e do lubrificante utilizado. Os parâmetros elucidados abaixo serão entradas na Lei de Petroff.

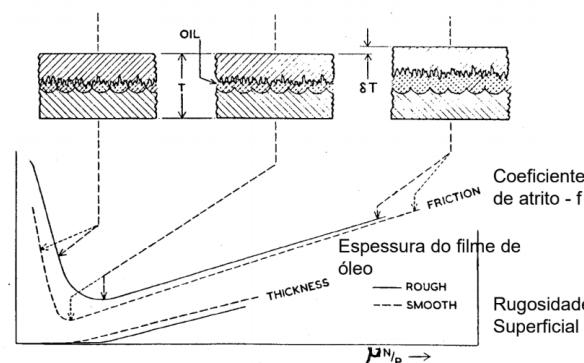


- W : Força radial atuante no eixo
- l : comprimento do eixo
- c : folga radial
- N : rotação do eixo
- P : carga lateral por área projetada
- μ : coef de viscosidade do óleo

$$f = 2\pi^2 \frac{\mu N r}{P c} \quad (1)$$

Não será cobrado conceitos sobre como executar a fórmula acima, todavia é importante entendê-la qualitativamente.

Plotando os valores do **coeficiente de atrito** para diferentes configurações de $\frac{\mu N}{P}$ teremos uma curva com este perfil:



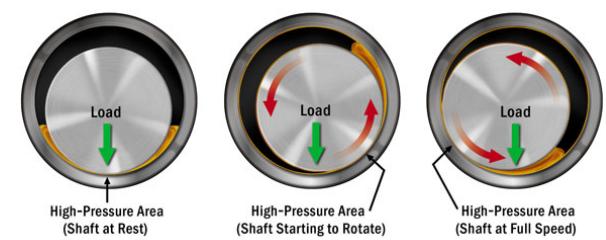
Esta curva também é conhecida como **A curva de Stribeck**, conforme visto em PMT3200. A análise desta curva nos permite classificar alguns regimes de lubrificação.

- Lubrificação Limite:** Regime de maior desgaste, há amplo contato entre as peças, devido a fina camada de óleo
- Lubrificação Mista:** Óleo sustenta parcialmente a carga do eixo
- Lubrificação Hidrodinâmica:** Total separação entre o eixo e o mancal, o eixo fica girando sobre uma fina camada de óleo

Mancal Hidrodinâmico

TL;DR

- Aplicações em grandes eixos, este mancal é capaz de aguentar grandes cargas
- Necessidade de lubrificação constante
- Câmara interna do mancal é feita do **metal de patente**, um metal mais mole que o eixo, que não irá causar danos ao eixo caso haja contato.
- Parâmetros de projeto: (1) velocidade do eixo, (2) viscosidade do lubrificante, (3) carga atuante no mancal, (4) folga diametral



Funcionamento. Este mancal tem como fundamento o eixo girar **sem haver contato** com o mancal, onde o eixo deve girar sobre uma fina camada de lubrificante que isola totalmente o contato metal-metal, evitando assim **desgaste por abrasão**. Tal fenômeno depende de alguns fatores e está intimamente ligado a **Lei de Petroff** e a **Curva de Stribeck**.

Lubrificação. Este mancal possui **Lubrificação Constante**, isto é, sempre estará entrando lubrificante no mancal, e sempre estará saindo, de maneira que é necessário algum mecanismo para reaproveitar o lubrificante, além disso na maioria das aplicações o lubrificante entra devido a ação da gravidade, todavia há aplicações em que há lubrificação por pressão. O lubrificante deve ser escolhido com cuidado, pois uma **viscosidade muito baixa** haverá lubrificação limite, havendo contato metal-metal, e **viscosidade muito alta** haverá superaquecimento do mancal.

Material. Quanto ao material, utiliza-se a liga **metal de babbitt** que é uma composição de **Chumbo(Pb)**, **Estanho(Sn)**, **Antimônio(Sb)** e **Cobre(Cu)**. Tal metal é mais mole que o material dos eixos, de sorte que, ao haver contato entre o eixo e a câmara interna, apenas a câmara deve sofrer desgaste por abrasão, desta forma esta liga é altamente frequente em mancais hidrodinâmicos.

Mancais Hidrostáticos

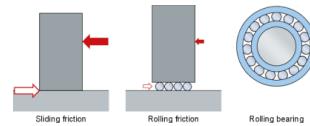
São mancais cujo funcionamento é igual ao do **mancal hidrodinâmico**, todavia a injeção de lubrificante é feita de forma **pressurizada**, o que significa que deve haver um mecanismo de pressurização do óleo além de reutilização. Todavia este mancal é muito útil quando a aplicação exige que o eixo tenha movimento intermitente.

Mancais Aeroestáticos

- Mancais cujo contato eixo mancal é anulado. Eixo fica flutuando sobre uma camada fina de ar
- Aplicações onde o eixo deve girar em altíssima velocidade
- Alto custo associado ao equipamento

9 Mancais de Rolamento

É possível reduzir o dano por atrito causado entre o rolamento das superfícies com a utilização de superfícies de geometria rolante, como ilustrado abaixo. Este é a principal diferença entre mancais de deslizamento e mancais de rolamento. **Rolamentos Blindados** são os que já são vendidos lubrificados para vida.

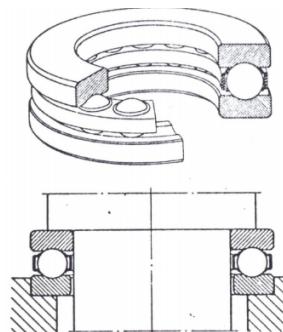


Quanto ao elemento rolante, há várias opções como

- (a) **Cilíndrico**
 - (i) Maior capacidade de carga
 - (ii) Aneis são separáveis
 - (iii) Pode-se modificar as cargas dado a configuração de ombros, é possível fazê-lo resistir à cargas axiais.
- (b) **Contato Angular**
 - (i) Elemento esférico montado de sorte que tenha contato angular com a superfície
 - (ii) Inclinação do contato aumenta cargas axiais resistidas
 - (iii) Porém suporta cargas axiais apenas em um sentido
- (c) **Cônico**
 - (i) Grandes forças inclinadas (isto é com componente axial e radial)
 - (ii) São desmontáveis em caso de força na direção oposta à qual ele resiste
- (d) **Esférico**
 - (i) Mais comum, mais barato
 - (ii) Suporta cargas radiais
 - (iii) Cargas leves e médias
 - (iv) Aumento da carreira de esferas aumenta a capacidade de carga aguentada
- (e) **Agulhas**
 - (i) Somente carga radial
 - (ii) Carga axial desmonta o mancal

(iii) Usado em casos de falta de espaço

(f) Axial de Esferas

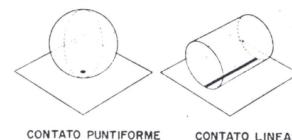


- (i) Resiste à forças axiais em apenas uma direção, aquela a qual comprimirá a esfera contra a pista
- (ii) Pode ser demonstrado caso haja cargas na outra direção

(g) Rolamento autocompensador de esferas

- (i) Mancal que possibilita giro do anel interno para compensar variação angular do eixo

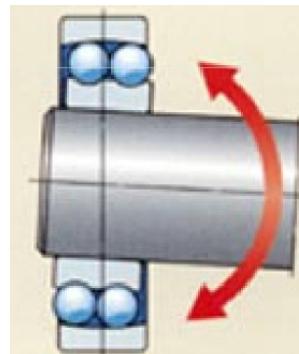
Algo a ser levado em consideração na escolha do elemento rolante é a superfície de contato entre os elementos e a superfície.



Como é visível, uma esfera tem apenas um ponto de contato, o que faz a tensão deste ponto ser muito elevada relativo a um cilindro que possui uma linha de contato.

Rolamento Autocompensador de Esferas

Rolamento que há um jogo para que o eixo possa se deslocar angularmente, a pista interna pode ser movimentar para o lado para permitir a movimentação do eixo.



Exemplo de aplicação: Treins. Há carga lateral muito grande nos eixos que transmitem momento para as rodas, ao utilizar este mancal, como há movimentação do eixo em $\approx 1^\circ$, o eixo recebe menor quantidade de forças.

Especificação do Mancal

Mancal é nomeado através do seu código, baseados no seu diâmetro interno. Dado um diâmetro interno, há varias opções de diâmetro externo, **aumentando o diâmetro aumenta-se o elemento girante**, portanto aumenta-se a carga suportada. Além disto, pode-se aumentar a largura do mancal para aumentar a resistencia mecânica do elemento.

São 5 algarismos

- (a) Tipo de mancal
- (b) Serie de diâmetro externo
- (c) Série de largura
- (d) Últimos 2, Diâmetro interno dividido por 5

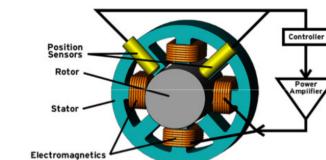
Monagem do Mancal. Geralmente pista interna com interferencia, pista externa com folga. A montagem da pista externa com interferencia gera forças de compressão que podem prejudicar o giro do eixo interno. O fabricante tem as características do mancal, logo ele dita as configurações de montagem do mancal.

Lubrificação de Mancais

- **Graxa:** Até certa faixa de rotação utiliza-se a graxa, esta faixa de velocidade é dita pelo fabricante. Necessidade de desmontar o mancal, limpar a graxa, e inserir a nova graxa limpa.
- **Óleo:** Rotações mais rápidas necessita-se a utilização de óleo. Pode ser utilizado uma **bomba de óleo** para lubrificação constante, ou pode-se utilizar um mesmo óleo em circuito fechado.

Geralmente utiliza-se vedações para que não entre sujeiras no mancal.

Mancal Magnético



Qualidades:

- (a) Não há limite de velocidade
- (b) Mancais magnéticos não possuem contato magnético
- (c) Elevada capacidade de carga, dependendo do controle, teria carga infinita.

Defeitos:

- (a) Back up em caso de falha energética
- (b) Estrutura muito mais sofisticada, preço altíssimo.

Mancais lineares

Mancais utilizados para converter o movimento rotativo de um eixo em um movimento linear de um mancal acoplado a este eixo, que permite utilizar este como uma guia de movimento para o mancal.

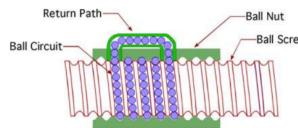
Exige configurações especiais no eixo, como **baixa rugosidade superficial** e **alta dureza** para as esferas rolarem sem prejudicá-lo.

Guias Lineares

Utilização em situações onde há esforços de maior magnitudes, há uma geometria especial para o eixo, onde há um trilho onde correm as esferas da guia linear.

Fuso de Esferas Recirculantes

Contato entre o eixo e a peça é dado por esferas que irão percorrer um circuito fechado dentro do fuso, que através da rotação do eixo irá gerar uma força axial no fuso de sorte que haja movimento, a direção de movimentação do fuso depende da direção de rotação do eixo.



Vantagens:

- (a) Altíssima capacidade de carga
- (b) Altíssima rigidez
- (c) Boa precisão

Desvantagens:

- (a) Movimentação limitada
- (b) Opera mal em presença de folga, necessita-se de pre carga para reduzir a folga. Em consequência aumenta o atrito

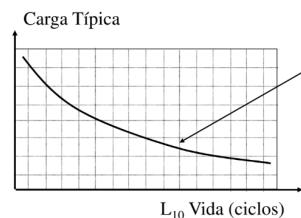
Vida de um Rolamento

O gráfico abaixo apresenta a quantidade de ciclos que um mancal é capaz de resistir em 10^{10} . Tendo em mão um destes pontos é possível plotar o restante pela relação

$$\frac{L_2}{L_1} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^p$$

Onde p é uma constante da geometria, usualmente

- geometria esférica: $p = 3$
- geometria de rolo: $p = 3.33$



Capacidade de Carga Dinâmica. Carga a qual o mancal é capaz de resistir à 10^6 ciclos, para 90% ou mais dos mancais testados.

Pode-se variar outros parâmetros além da carga, portanto estabelece-se uma relação com mais parâmetros entre a vida dos mancais.

$$L_{10} = a_1 a_2 a_3 \left(\frac{C}{P}\right)^p$$

- a_1 fator de confiabilidade
- a_2 fator do material
- a_3 fator do serviço
- P carga dinâmica equivalente

O fator de confiabilidade varia com a confiabilidade de acordo com a tabela abaixo.

Como escolher um mancal

- (a) Definir o tipo de rolamento, e.g radial, axial
- (b) Definir o tipo de elemento rodante, i.e definir a constante p
- (c) Definir a vida em horas para a aplicação
- (d) Definir as cargas as quais o mancal estará submetido
- (e) Definir a confiabilidade
- (f) Calcular a vida L_{10}
- (g) Dado a vida, calcular a Capacidade de Carga
- (h) Escolher um rolamento do catálogo
- (i) Recalcular a vida em horas

Comparação entre mancais de Rolamento e Deslizamento

Vantagens:

- (a) Menor atrito e aquecimento, o mancal de rolamento oferece geometria como esferas que possibilitam a redução de atrito entre as partes
- (b) Pouca variação do coeficiente de atrito com a variação de velocidade e de carga
- (c) Baixa exigência de lubrificação
- (d) Ocupa menos espaço axial

Desvantagens:

- (a) Maior sensibilidade aos choques
- (b) Maiores custos de fabricação
- (c) Não suporta cargas tão altas quanto o mancal de deslizamento
- (d) Ocupa maior espaço radial
- (e) Pequena tolerância para alojamento do eixo

10 Cubo-Eixo

Transmissão do movimento do eixo ao cubo, portanto transferência de momento torsor

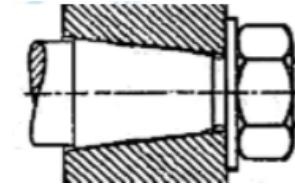
Fixação Cubo-Eixo por Atrito

Fixação através de um ajuste forçado, portanto utilizando somente o atrito para fixar.

- Limite do torque para que não haja deformação plástica do eixo
- Não necessita usinagem do eixo
- Não adiciona uniformidades nas peças, portanto não há concentradores de tensão
- Baixo custo
- Dano na desmontagem

Assento Cônicos

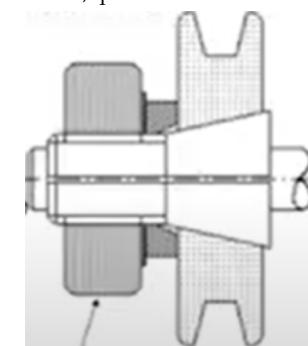
Através de uma parte côncica do eixo e uma porca na parte cilíndrica, fixa-se o eixo ao cubo pela força axial da porta, e há transmissão de momento torsor através do atrito entre o assento côncico e a parte conica do eixo



- Limite elástico dos materiais
- Não causa danos na desmontagem
- Necessidade de usinagem
- Gera concentração de tensão
- Alto custo

Bucha Cônica

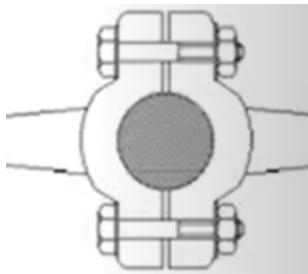
Coloca-se uma bucha que vai fixa ao eixo, de maneira que se possa utilizar um sistema de fixação em qualquer parte ao longo do eixo. Funciona como a fixação do Assento Cônicco, porcas prendem por tensões axiais a bucha, que irá transmitir os esforços do eixo para o cubo pelo atrito.



- Limite elástico dos materiais
- Não causa danos na desmontagem
- Necessidade de usinagem
- Gera concentração de tensão
- Ajuste axial e angular eixo-cubo
- Alto custo

Cubo Bipartido

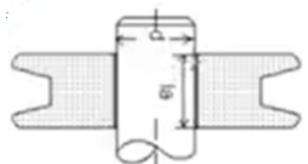
Cubo é fixado através de elementos de fixação em ambos lados. O controle da força de compressão do cubo ao eixo é dada pelo torque que é aplicado nos elementos de fixação. O peso em ambos lados deve ser igual para que não haja desbalanceamento.



- Há problemas para limitar a força no limite elástico no material
- Ajuste axial e angular
- Sem concentração de tensão
- Não há danos na desmontagem
- Alto custo

Fixação Cubo-Eixo por Adesão

união em que utiliza-se de um adesivo para fixar o sistema Cubo-Eixo, havendo limitação do torque torsor pelo limite de cisalhamento do mesmo.



Área da união: $S_a = l_a \pi d$ Força cisalhamento no adesivo: $F_t = 2 \frac{M_t}{d}$

Tensão de cisalhamento: $\frac{F_t}{S_a}$

Sem ruptura da união sem $t \leq t_a$. Portanto as variáveis em que há possibilidade de se alterar é a área de união e a tensão máxima de cisalhamento do adesivo.

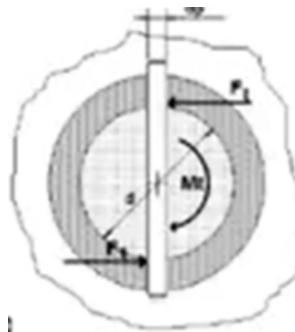
$$l_a \geq \frac{2M_t}{(d^2 t_a \pi)}$$

l_a é o comprimento axial.

- Alto custo

Fixação por Travamento

Travamento através de elementos mecânicos, num primeiro caso, utiliza-se um pino transversal para realizar o travamento do sistema cubo-eixo, permitindo maiores torques transmitidos.



Ajuste aderente do pino ao sistema cubo-eixo. O pino pode fallhar por cisalhamento.

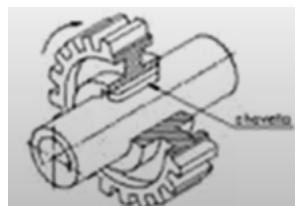
- Conjugado no eixo: $M_t = F_t * \frac{d}{2}$
- Diametro do eixo: d
- Tensão admissível ao cisalhamento no pino: t_a
- Diametro do pino: d_p

Formula para dimensionamento do pino: $d_p \geq 2 \sqrt{\frac{M_t}{\pi d t_a}}$

- Necessidade de usinagem tanto do cubo tanto do eixo
- Elemento de fixação extra
- Torque transmitidos são superiores
- Facil desmontagem
- Sem ajuste angular nem axial
- Gera descontinuidade na peça, portanto concentração de tensão

Chavetas ou perfis entalhados

Eixo com chaveta que encaixa num rasgo do cubo, transmitindo o movimento pela fixação mecânica da chaveta. Ou pode-se fazer um perfil entalhado que encaixa no perfil do cubo



Falha por cisalhamento em chaveta.

- Área da União: $S_t = bL_t$

- Força de cisalhamento da união: $F_t = 2 \frac{M_t}{d}$
- Tensão de cisalhamento uniforme: $t = \frac{F_t}{S_t}$

Para não haver deformação plástica:

$$L_t \geq \frac{2M_t}{dt_a b}$$

Falha por esmagamento em chaveta.

- Área da União: $S_c = \frac{h}{2} L_c$

- Força de compressão da união: $F_c = 2 \frac{M_t}{d}$
- Tensão de compressão uniforme: $\sigma = \frac{F_c}{S_c}$

Para não haver deformação plástica:

$$L_c \geq \frac{4M_t}{d\sigma_a h}$$

Falha por cisalhamento no entalho.

- N é o numero de dentes do entalho

- η é o coeficiente de correção de carga, geralmente $\eta = 1.25$

Para não haver deformação plástica:

$$L_{et} \geq \frac{2M_t \eta}{dt_a b N}$$

Falha por esmagamento no entalho.

- N é o numero de dentes do entalho

- η é o coeficiente de correção de carga, geralmente $\eta = 1.25$

Para não haver deformação plástica:

$$L_{ec} \geq \frac{2M_t \eta}{d\sigma_a h_e N}$$

Norma técnica DIN 6885 mapea, em função do diametro, outros parametros para o projeto, como largura e altura da chaveta plana no cubo e no eixo.

Características

- Conjugados moderados à elevados
- Desmonta facilmente
- Não há ajuste axial nem angular
- Usinagem extensa, tanto do cubo quanto do eixo, além de um novo elemento no caso da chaveta
- Há adição de descontinuidade, portanto havendo concentração de tensão
- Custo elevado

11 Fixação Eixo-Eixo

Elementos de máquina cujo objetivo é a transmissão de momento torsor.

Acoplamento

- Montagem e desmontagem para manutenção do equipamento
- Compensar desalinhamento entre os eixos
- Absorver ou isolar as vibrações entre as máquinas

Tipos de Acoplamentos

Rígidos. • Não permitem desalinhamento

- Torsionalmente rígidos, resistência a torção muito alta, baixa chance de deformação de torção elástica
- Transmitem choques e vibração
- Baixo Custo
- Não exigem manutenção



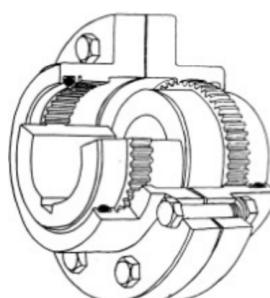
Possíveis Desalinhamentos.

- (a) Desalinhamento Axial
- (b) Desalinhamento Radial
- (c) Desalinhamento Angular

Em campo, ocorrem mistura destes desalinhamentos. Ter uma acoplagamento que exige alinhamento perfeito significa aumento do custo de montagem.

Elásticos. Características variam conforme o tipo de acoplamento flexível utilizado.

- Pelo fato de serem elástico não possuem sincronismo entre eixo motor e eixo movido
- Podem ser torsionalmente rígidos ou flexíveis
- Absorvem/isolam choques e vibrações mecânicas
- Exigem lubrificação manutenção
- Elemento mais caro



O funcionamento deste acoplamento divide-se em algumas etapas

- Momento torsor do eixo motor é transmitido ao cubo de eixo interno do acoplamento
- Cubo de eixo possui perfil entalhado transmite torque à carcaça externa do acoplamento
- Carcaça externa transmite torque ao cubo de eixo com perfil entalhado do eixo movido
- Cubo de eixo transmite torque ao eixo movido

Possui pequena tolerância a desalinhamento através do travamento do entalhe, cubo desliza num canal interno da carcaça interna.

Qualidades:

- Grande flexibilidade angular
- Sincronismo entre eixo motor e eixo movido
- Permite desalinhamento entre os eixos

Desvantagens:

- Exigem Lubrificação, graxa
- Alto custo devida ao preço de usinagem
- Absorvem pouca vibração e choque mecânico



Pinos ligam as partes através de furos cónicos que permitem a compensação à desalinhamentos. Possuem molas para resistência mecânica

Totalmente Flexíveis



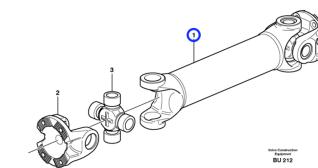
Qualidades

- Maior flexibilidade de desalinhamento
- Absorção/isolamento de vibrações/choques

Defeitos

- Menor rigidez
- Problemas de sincronismo entre os eixos
- Manutenção/lubrificação
- Custo Elevado

Para grandes movimentações angulares. Consegue ligar eixos que estão em grandes distâncias entre si, e que através de uma cruzeta é possível grandes movimentações angulares. Alta capacidade de transmissão de torque.



Características positivas:

- (a) Grande transmissão de torque
- (b) Grande flexibilidade angular
- (c) Bom sincronismo entre os eixos, materiais metálicos

Características negativas

- (a) Necessidade de lubrificação
- (b) Não absorvem/isolam esforços mecânicos
- (c) São de custo elevado



Junta Homocinética.

Critérios de Seleção

- Torque da máquina
- Regime de operação: contínuo, intermitente...
- Rotação máxima de operação
- Tipos de desalinhamentos

12 Transmissões

P_e Potência de saída

P_s Potência de entrada

$$P_e * \eta = C_e \omega_e * \eta = P_s = C_s \omega_s$$

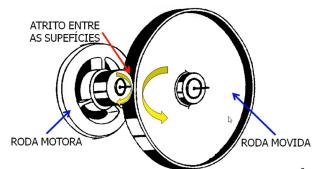
Onde μ é o rendimento de transmissão de potência

$$i = \frac{\omega_e}{\omega_i}$$

$$C_s = i C_e$$

Tipos de Tranmissão

Tranmissão por Roda. Elemento circular de menor diâmetro encastrado à um elemento circular de maior diâmetro. É necessário que haja uma compressão entre os elementos para haver a transmissão da velocidade.



$$Fat = \mu N$$

$$Mt = \frac{Fat D}{2}$$

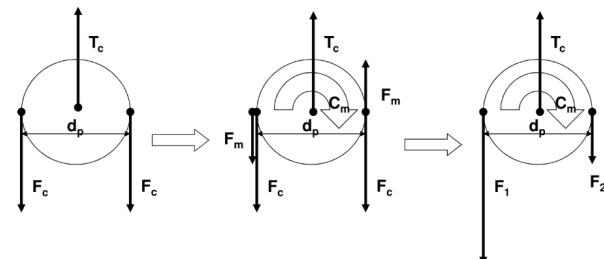
$$i = \frac{D}{d}$$

Por curiosidade, trens e carros tem que se mover com velocidade menor quando chove, pois há menor atrito, e portanto menor capacidade de transmissão de torque

- Projetos não possuem tamanho compacto
- Apenas transmissão entre elementos paralelos
- Relação de transmissão não é cte, por conta do escorregamento
- Não há padronização é necessário um projeto para cada caso
- Relação de transmissão até 6

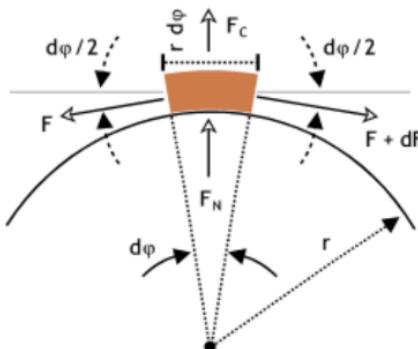
Tranmissão por Correia. É necessário que a correia esteja em compressão em relação a polia para gerar uma força de atrito. Portanto vê-se necessário a montagem com uma pré tensão.

O princípio de funcionamento de transmissão das correias se da pela força do atrito gerada entre a superfície da correia e a polia, que faz com que as forças tensionadoras atuantes na correia sejam diferentes proporcionando movimentação. Há uma relação direta entre a **força de atrito** e a **pré-tensão** aplicada à correia. (ver Fig 13)



A diferença na força atuante nos lados diferentes das correias pode ser esvaziada pel **equação de euler para correias**, cujas variáveis são o ângulo de abraçamento da correia e o atrito estático. (ver Figura 13).

$$\frac{S_1}{S_2} = e$$



Devido ao movimento circular realizado pelos pontos materiais da correia ao percorrer a polia, vê-se que tais pontos estão submetidos a forças centrifugas, de sorte que se forem muito elevadas, podem reduzir a aderência dos pontos materiais da correia à polia, resultando em atrito menor e por consequência menor transmissão de potência. Sabe-se que a equação de força centrífuga é $F_{cp} = \frac{v^2}{2R}$, portanto uma velocidade tangencial não é desejada para este tipo de transmissão.

Correias em V. Correia podem ser planas ou V. Isso se refere ao perfil da secção da polia, podendo ser plano ou em V.

Devido a maior área de contato entre a polia e a correia em V, uma mesma tensão máxima é atingida através de uma maior força de atrito aplicada à correia em V. A relação entre a capacidade de carga das correias é:

- N_v : Capacidade de carga da correia em V.
- N : Capacidade de carga da correia plana.

$$N_v = \frac{3,49}{2} N$$

O princípio de transmissão depende de algumas variáveis

- Coeficiente de atrito estático entre a polia e a peça
- Pressão entre a polia e a correia
- Pré carga aplicada entre o conjunto

Vulcanização?

Qualidades:

- Elemento flexível que pode auxiliar no isolamento de vibrações mecânicas
- Capacidade de transmissão elevada
- Projeto simples, havendo padronizações
- Funcionamento silencioso

Reveses:

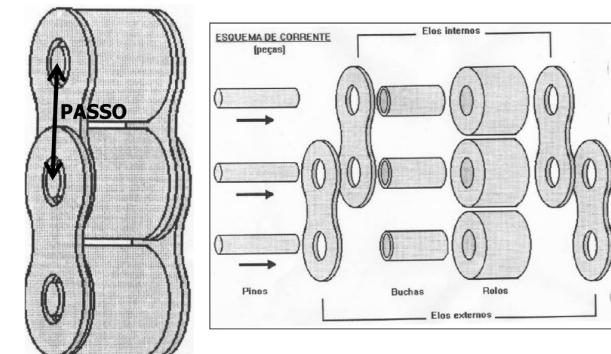
- Não é um projeto compacto
- Pode haver escorregamento
- Necessário manutenção

Correia Sincronizadora (Dentada)

Transmissão de movimento se da pelo contato e não pelo atrito

- Sincronismo entre eixo movido e eixo motor
- Peso menor
- Maiores velocidades
- Menor torque
- Menor raio de dobramento
- Maior custo

Tranmissão por Corrente. Correias são elementos de transmissão compostos por elos, que são elementos padronizados conforme pode-se visualizar na figura abaixo. Uma das características definidoras de uma corrente é o passo.



Modos de falha

- Fadiga das talas (porção lateral) dos elos
- Fadiga superficial dos componentes
- Desgaste entre pinos e buchas

Qualidades

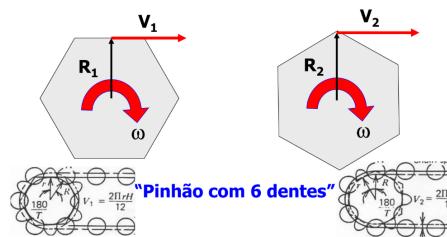
- Rendimento de transmissão elevado
- Custo reduzido, relativo a engrenagens, todavia mais caro que correia
- Sem escorregamento
- Uma corrente pode acionar diversas rodas
- Potência de transmissão até 5000 HP
- Sincronizadora

Defeitos

- Projeto não compacto
- Montagem só entre eixos paralelos
- Necessidade de lubrificação
- Velocidade tangencial até $17 \frac{m}{s}$

Efeito Poligonal

Como pode ser visto na figura abaixo, o elo da corrente pode acoplar com a roda dentada em diferentes posições, formando uma distância em relação ao centro diferente, e como a velocidade tangencial da corrente é dada por ωr , é possível concluir que dependendo da posição na qual o elo acopla à roda, haverá uma flutuação na velocidade, impactando na potência transmitida.

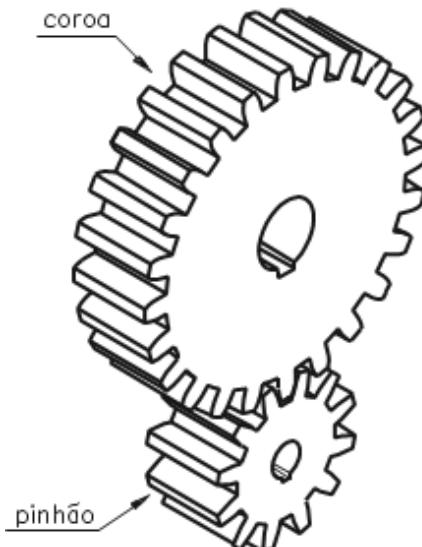


O efeito poligonal decresce com o aumento do número de dentes na roda.

13 Transmissão por engrenagens

Alternativa à transmissão de movimento em relação à correias. Transmissão de movimento se da pelo contato entre os dentes das engrenagens. Esta forma de transmissão ela pode operar entre eixos paralelos e até eixos perpendiculares. São utilizadas quando a transmissão de torque é muito alta. **Diametro primitivo. Angulo de pressão**

Na nomenclatura usual, utiliza-se a denominação de **coroa** para a engrenagem maior e **pinhão** para a engrenagem menor.



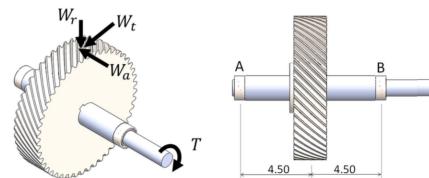
Tipos de Engrenagens

Engrenagem Cilindrica de Dentes retos. Engrenagem que possui dentes retos, portanto uma engrenagem aplica apenas uma força tangencial e normal à outra.

Engrenagem Cilindrica Helicoidal. Engrenagem que possui dentes retos, portanto uma engrenagem aplica apenas uma força tangencial e normal à outra.

Pelo fato dos dentes serem helicoidais, o contato é feito de maneira gradual, de sorte que há um gradiente de força aplicado a superfície da engrenagem. Esse comportamento reduz consideravelmente o barulho

envolvido na transmissão. Outra vantagem da engrenagem helicoidal, é que ela suporta cargas axiais, o que simplifica todos os outros componentes envolvidos na transmissão, pois mais carga estará sendo suportada pela engrenagem.



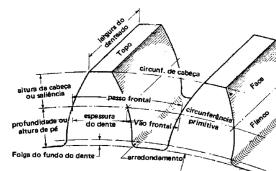
Engrenagem Espinha de Peixe. Engrenagem helicoidal com uma direção até o meio da altura da engrenagem a na outra direção no restante, o objetivo desta engrenagem é aumentar a eficiência em relação à cargas axiais que a engrenagem suporta.

Transmissão

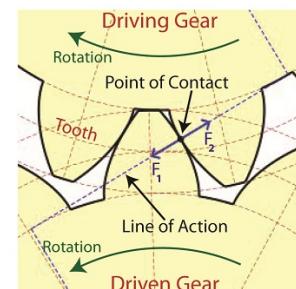
Lança-se mão do conceito de **circunferência primitiva** que é um região abstrata da engrenagem à qual diversos parametros estão associados, todavia não é possível enxergá-la fisicamente. Outra curva interessante é a **base do círculo** de cada engrenagem, referente à circunferência externa de cada engrenagem.

[Evolvente]

$$\begin{aligned} A_1 - A_0 &= B_1 - A_0 \\ A_2 - A_0 &= B_2 - A_0 \\ A_3 - A_0 &= B_3 - A_0 \end{aligned}$$



A justificativa para o **perfil evolvente** nas engrenagens é que a linha de ação, portanto a trajetória feita pelo ponto de contato entre os dentes, seja uma reta tangente à ambos os círculos base. Nota-se pela figura abaixo que há um ponto de contato entre as **circunferencias primitivas**, este ponto é o CIR do movimento, e o ângulo entre a tangente desse ponto e a linha de ação chamado de **angulo de pressão**.



Tal geometria garante um movimento sincronizado contínuo entre as engrenagens, sem variação de velocidade. É importante ressaltar que a força aplicada nas superfícies das engrenagens sempre será normal ao ponto de contato.

Usinagem

Utiliza-se uma ferramenta que possua um formato negativo em relação à engrenagem.

Relação de Tranmissão

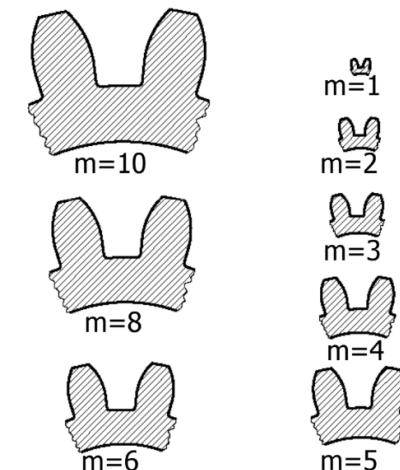
$$i = \frac{d_2}{d_1} = \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{n_1}{n_2}$$

- n_i : Rotação da engrenagem i , para calcular a velocidade angular, basta $\omega = 2\pi \times n_i$
- d_i : Diâmetro primitivo da engrenagem i
- Z_i : Número de dentes da engrenagem i

Para haver engrenamento entre as engrenagens é necessário que ambas as peças possuam o mesmo ângulo de pressão e que possuam o mesmo módulo.

$$m = \frac{D_p}{z}$$

Vale ressaltar que as engrenagens devem possuir a mesma velocidade tangencial em suas posições do ângulo primitivo.



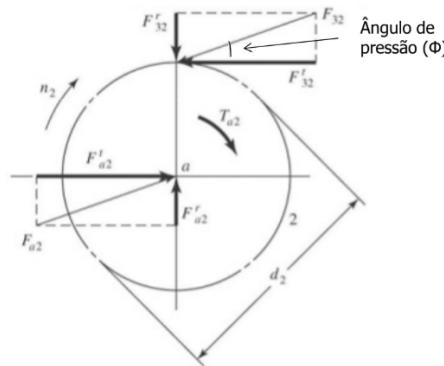
Para um mesmo diâmetro primitivo, quanto maior o módulo, menor são os números de dentes, todavia maior seão as suas dimensões. Através do módulo também é possível determinar o passo das engrenagens.

Modos de Falha

Só ha esforço quando as engrenagens estiverem engranadas, portanto caracteriza-se um esforço cílico.

- Falha por fadiga
- Trinca na raiz do dente, por conta do momento aplicado no momento do engrenamento

Esforços



- Movimento sincronizado
- Relação de transmissão constante
- Potência de transmissão até 2500HP

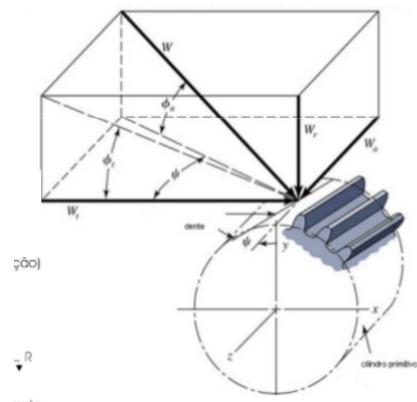
Desvantagens:

- Relação de transmissão entre um par de engrenagem até 8 (exceto coroa sem-fim)
- Custo elevado
- Elementos não padronizados

$$W_t = F_{32}^t$$

$$T = \frac{d}{2} W_t$$

$$F_{23}^r = F_{23}^t \tan(\phi)$$



$$W_r = W \sin(\phi_n)$$

$$W_t = W \cos(\phi_n) \cos(\psi)$$

$$W_a = W \cos(\phi_n) \sin(\psi)$$

Características

Vantagens:

- Projeto compacto