

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Órgãos de Máquinas II

Elaborado e revisto por Paulo Flores, José Gomes, Nuno Dourado e Filipe Marques - 2017



Universidade do Minho
Departamento de Engenharia Mecânica
Campus de Azurém
4804-533 Guimarães - PT

Tel: +351 253 510 220
Fax: +351 253 516 007
E-mail: pflores@dem.uminho.pt
URL: www.dem.uminho.pt



Universidade do Minho
Departamento de Engenharia Mecânica
Campus de Azurém
4804-533 Guimarães - PT

Tel: +351 253 510 220
Fax: +351 253 516 007
E-mail: jgomes@dem.uminho.pt
URL: www.dem.uminho.pt



Universidade do Minho
Departamento de Engenharia Mecânica
Campus de Azurém
4804-533 Guimarães - PT

Tel: +351 253 510 220
Fax: +351 253 516 007
E-mail: nunodourado@dem.uminho.pt
URL: www.dem.uminho.pt



Universidade do Minho
Departamento de Engenharia Mecânica
Campus de Azurém
4804-533 Guimarães - PT

Tel: +351 253 510 220
Fax: +351 253 516 007
E-mail: fmarques@dem.uminho.pt
URL: www.dem.uminho.pt



T.03 – TRANSMISSÕES POR CORRENTES

1. Introdução
2. Nomenclatura
3. Relações Geométricas
4. Efeito Poligonal
5. Seleção de Correntes
6. Lubrificação e Manutenção
7. Análise Dinâmica
8. Avarias em Correntes
9. Referências Bibliográficas

Tipos de Correntes

As correntes ocupam um lugar de destaque entre os sistemas de transmissão de movimento. Os principais tipos de correntes são: as correntes de **rolos**, as correntes de **buchas** e as correntes de **dentes**, tal como se ilustra na figura 1.



Fig. 1 Principais tipos de correntes: correntes de rolos, correntes de buchas e correntes de dentes

As **correntes de rolos** são as mais comuns em aplicações industriais. Estas correntes são constituídas por **placas internas** e **externas ligadas por pinos**. Os pinos são envolvidos por **buchas** nas quais funcionam (rolam) os rolos. Os pinos, as buchas e os rolos são fabricados em aço de liga, cujas superfícies são, em geral, **cementadas e retificadas**.

A figura 2 mostra os **elementos constituintes** das correntes de rolos de uso mais frequente.

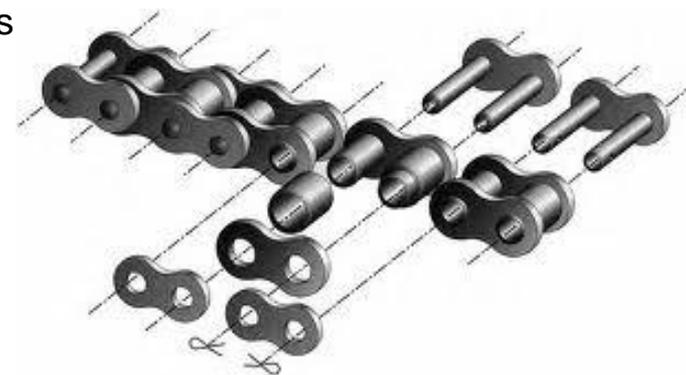


Fig. 2 Constituintes das correntes de rolos

Tipos de Correntes

As **correntes de buchas** (figura 3) diferem das de rolos pelo facto de **não possuírem rolos**. Este facto permite que as buchas e os pinos sejam de **dimensões maiores** e, por conseguinte, as correntes de buchas apresentam maior resistência à rotura.

As correntes de buchas são **menos silenciosas**, apresentam maior escorregamento (desgaste) e, por isso, uma maior **perda de rendimento**.



Fig. 3 Corrente de buchas

As **correntes de dentes** (figura 4) são constituídas por **elos os quais são constituídos por várias placas** montadas lado a lado sobre pinos formando dentes que vão engrenar nos dentes da roda. Deste modo, podem obter-se correntes **bastante largas** e, conseqüentemente, **bastante resistentes**.

As correntes de dentes são **muito silenciosas** e apresentam baixos níveis de desgaste.



Fig. 4 Corrente de dentes

Tipos de Correntes

Há ainda **correntes de passo alongado**, tal como se mostra na figura 5.

A figura 6 ilustra **elos de uma corrente de rolos**. Na figura 7 estão representadas correntes de rolos **simples**, **dupla** e **tripla**.



Fig. 5 Corrente de passo alongado



Fig. 6 Elos de uma corrente de rolos



Fig. 7 Correntes de rolos: simples, dupla e tripla

Exemplos de Aplicação de Correntes

A figura 8 mostra alguns exemplos de aplicação de correntes de rolos e correntes dentadas.

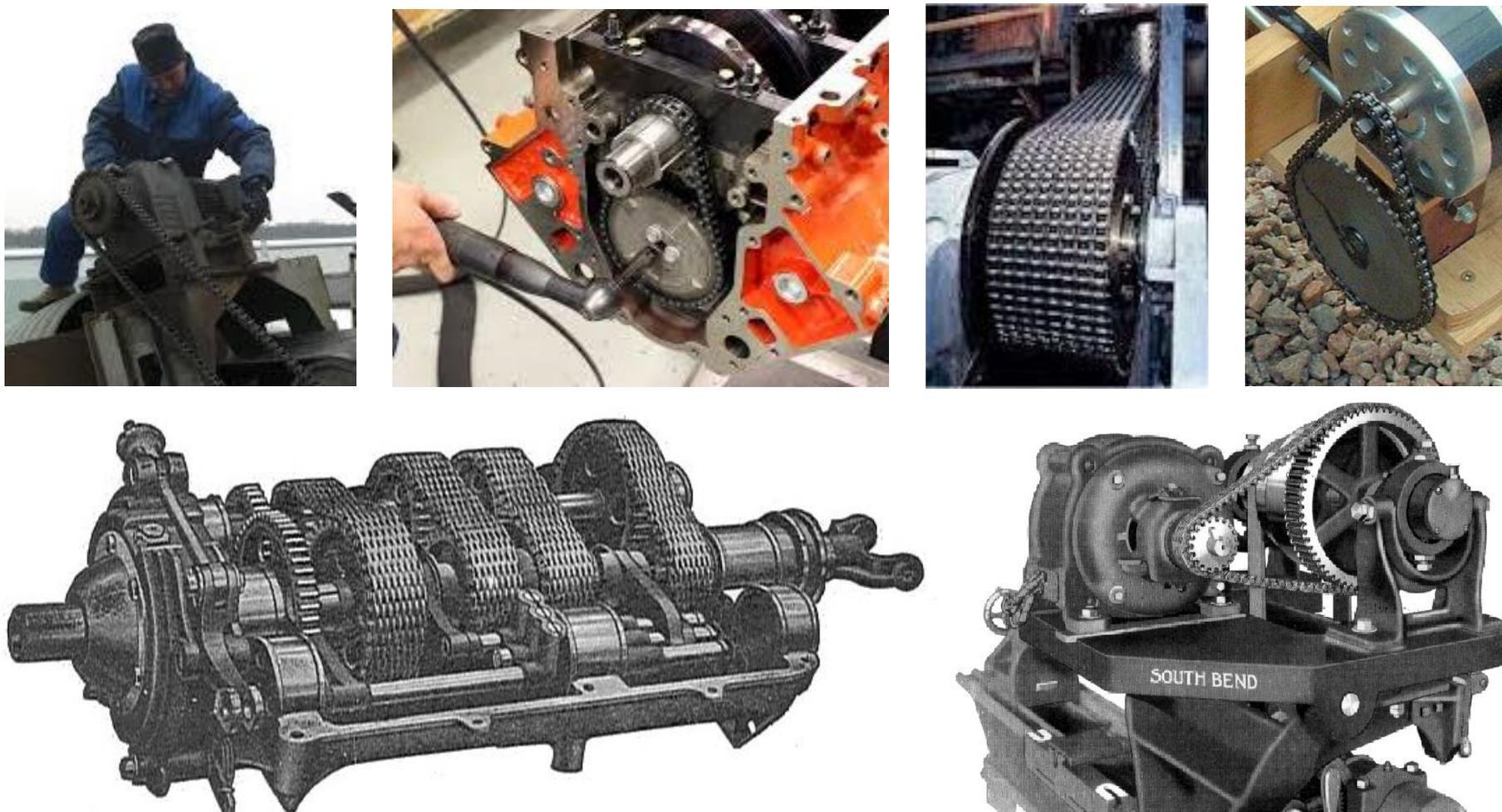


Fig. 8 Exemplos de aplicação de correntes de rolos e correntes dentadas

Principais Características das Correntes

De seguida apresentam-se as principais características dos sistemas de transmissão por correntes:

- As correntes só devem operar entre **veios rigorosamente paralelos**
- As correntes requerem ainda um **perfeito alinhamento** entre o pinhão e a roda
- As correntes apresentam **baixa resistência às condições ambientais** e requerem frequentemente **sistemas de proteção**
- As correntes **requerem, em geral, lubrificação**, cujo modo depende das condições de funcionamento (potência e velocidade)
- Nas correntes as **relações de transmissão** podem atingir o valor de **7**
- As correntes apresentam uma **duração longa** (até 15000 horas) sem necessidade de substituição de corrente e rodas
- As correntes **não apresentam capacidade de absorção de choques**, como acontece com as correias, dada a natureza metálica dos materiais envolvidos
- As correntes **não apresentam constância** do valor instantâneo da **relação de transmissão** de velocidade devido ao **efeito poligonal**
- Nas correntes a **manutenção** é, em geral, **fácil de realizar**
- As correntes apresentam um rendimento de **97-98%**
- No que diz respeito à transmissão de potência (binário, movimento), as correntes situam-se **entre as correias e as engrenagens**.

Nomenclatura Básica

Na figura 9 apresentam-se os **principais parâmetros** que definem a geometria de uma corrente de rolos.

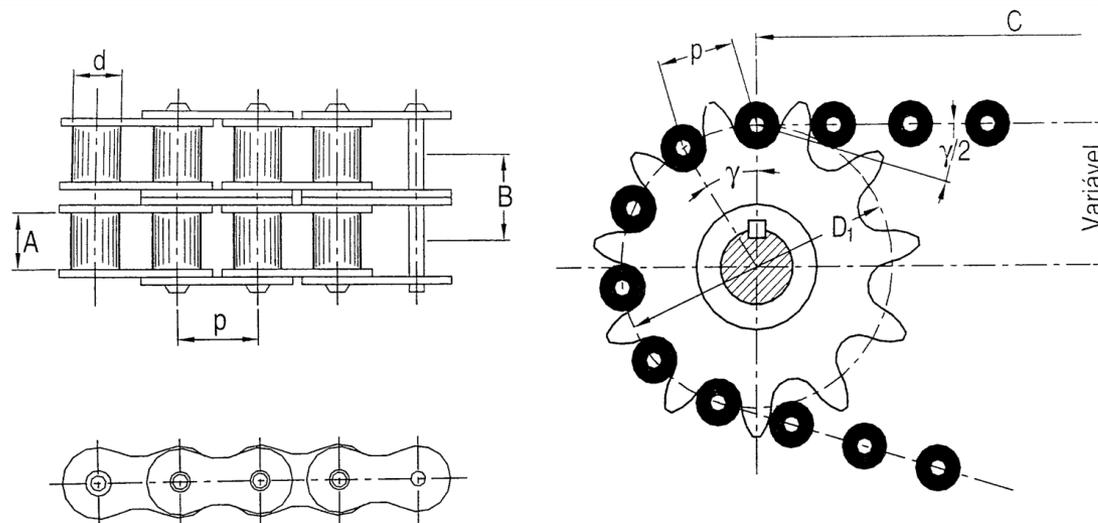


Fig. 9 Geometria de uma transmissão por corrente de rolos

p – Passo, distância entre os eixos de dois pinos adjacentes

$\gamma/2$ – Ângulo de inclinação, ângulo de rotação dos elos quando entram em contacto com o pinhão

d – Diâmetro do rolo

D_1, D_2 – Diâmetros primitivos do pinhão e da roda

Z_1, Z_2 – Número de dentes do pinhão e da roda

n_1, n_2 – Velocidade de rotação do pinhão e da roda

A – Largura entre placas

B – Distância entre centros de rolos (para correntes dupla e tripla)

C – Distância entre eixos

Diâmetro Primitivo

Considere-se a figura 10 para estabelecimento das principais relações geométricas nas correntes de rolos.

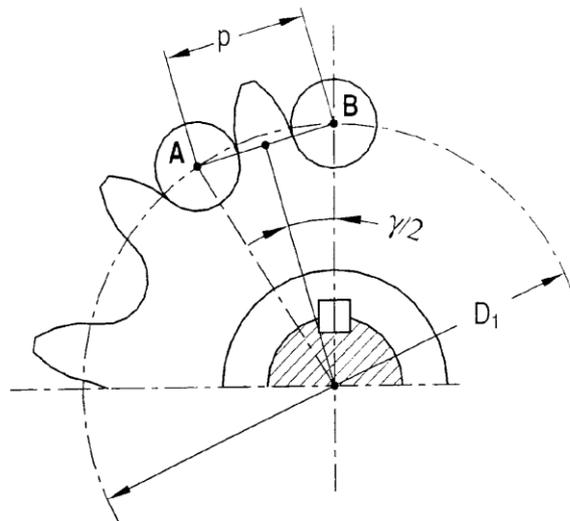


Fig. 10 Relação entre o passo p , o diâmetro primitivo D_1 e o ângulo de inclinação $\gamma/2$

Da análise da figura 10 podem escrever-se as seguintes relações geométricas

$$\gamma = \frac{2\pi}{Z_1} \qquad \frac{p}{2} = \frac{D_1}{2} \operatorname{sen}\left(\frac{\gamma}{2}\right)$$

Combinando as equações anteriores e eliminando γ obtém-se a seguinte relação para o **diâmetro primitivo**

$$D_1 = \frac{p}{\operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{Z_1}\right)}$$

Comprimento Primitivo

O comprimento primitivo da corrente (L) expresso em **número de elos** deve ser um número inteiro, de preferência **par**. Esta preferência tem como objetivo evitar a introdução de um **elo especial**.

O comprimento primitivo de uma corrente pode ser calculado utilizando a seguinte expressão:

$$L = \frac{\pi}{2p} (D_1 + D_2) + \frac{2C}{p} + \frac{(D_2 - D_1)^2}{4Cp}$$

Para **valores muito pequenos de γ** , as expressões para os diâmetros primitivos podem ser reescritas do seguinte modo

$$D_1 = \frac{pZ_1}{\pi} \qquad D_2 = \frac{pZ_2}{\pi}$$

Então, a expressão que permite calcular o **comprimento primitivo** é dada por

$$L = \frac{Z_1 + Z_2}{2} + \frac{2C}{p} + \frac{(Z_2 - Z_1)^2 p}{4\pi^2 C}$$

Assim, em projeto e seleção de correntes, depois de calculado o comprimento primitivo, deve escolher-se o **valor inteiro par** superior ao obtido pela expressão anterior.

Seguidamente, deve **redefinir-se o valor do entre-eixo** (C) utilizando a expressão supra mencionada para o comprimento primitivo.

Engrenamento da Corrente no Pinhão

A figura 11 diz respeito a **duas posições consecutivas** e desfasadas angularmente de um ângulo $\delta = \pi/Z_1$ do engrenamento da corrente com o pinhão.

Logo que o pinhão roda, no sentido indicado pela seta, de um ângulo $AOB = 2\delta$, o ponto A desloca-se para a posição B e o ponto D para a posição A .

O elo representado por AD , durante este tempo, rodou um ângulo AOB em torno do ponto A , a uma velocidade angular igual à velocidade angular do pinhão ω .

Assim, o **movimento relativo do elo é um movimento de rotação**, com velocidade angular ω .

Em resultado deste movimento, o rolo D entra em contacto com o ponto C do pinhão, animado de uma velocidade linear ωp .

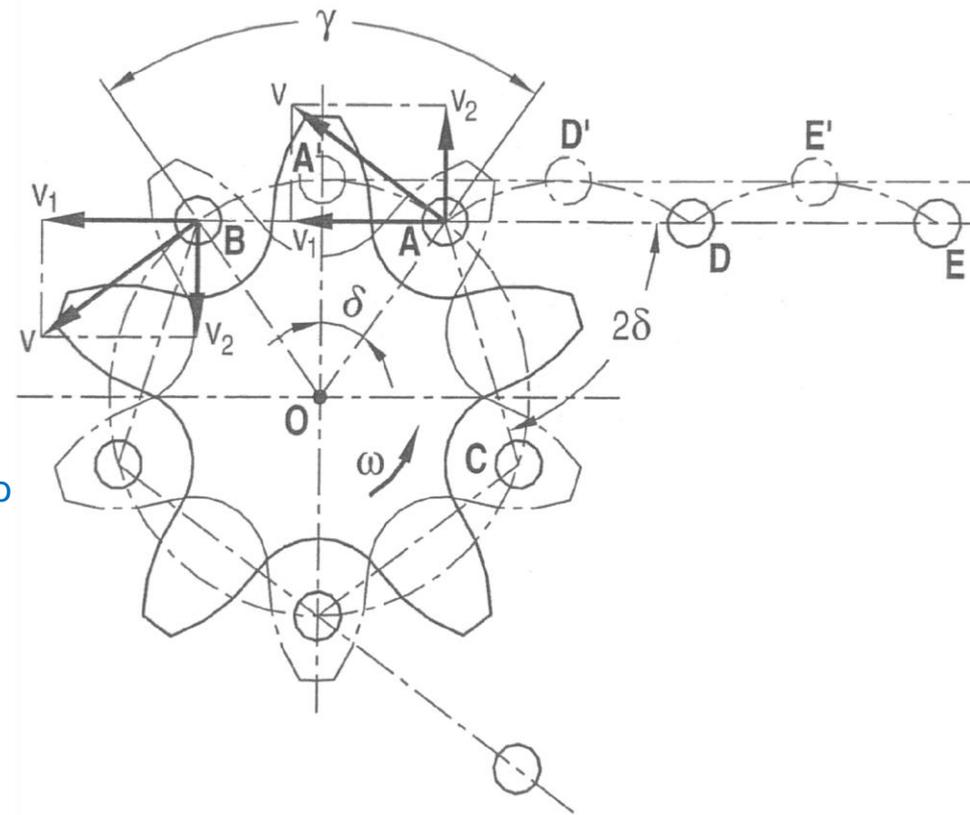


Fig. 11 Engrenamento da corrente com o pinhão

Engrenamento da Corrente no Pinhão

Admitindo que o **pinhão roda com uma velocidade angular constante**, então, no círculo primitivo, tem-se que

$$v = \frac{D_1}{2} \omega = \frac{\pi D_1 n_1}{60}$$

Esta velocidade pode ser decomposta **nas direções da corrente e perpendicular a esta**, ou seja

$$v_1 = v \cos \delta$$

$$v_2 = v \sin \delta$$

em que δ varia entre $\gamma/2$ e $-\gamma/2$.

Observa-se, portanto, que a corrente está sujeita a **dois movimentos simultâneos** de velocidades variáveis e desfasadas, ou seja:

- Um movimento de **avanço** no sentido longitudinal
- Um movimento de **oscilação** no sentido transversal

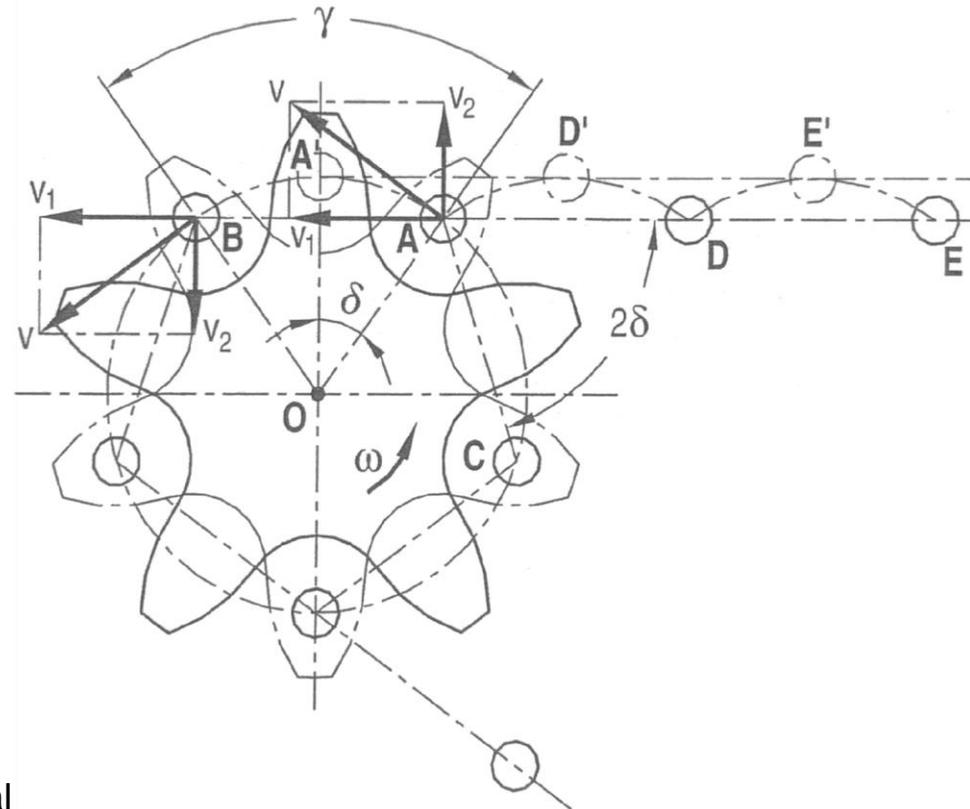


Fig. 12 Engrenamento da corrente com o pinhão

Variação da Velocidade Longitudinal – v_1

Durante o movimento correspondente ao ângulo AOB , a velocidade v_1 varia entre um valor mínimo dado por

$$v_1 = v \cos \frac{\pi}{Z_1}$$

que se verifica nos extremos A e B onde

$$\delta = \pm \frac{\pi}{Z_1}$$

e um valor máximo dado por

$$v_1 = v$$

que se verifica para a posição A' , em que $\delta = 0$.

A figura 13 ilustra a influência do número de dentes do pinhão Z_1 na oscilação da velocidade longitudinal.

Se o número de dentes for suficientemente grande, a oscilação da velocidade é muito pequena.

Observa-se que para $Z_1 > 25$, a oscilação na velocidade é, na prática, desprezável.

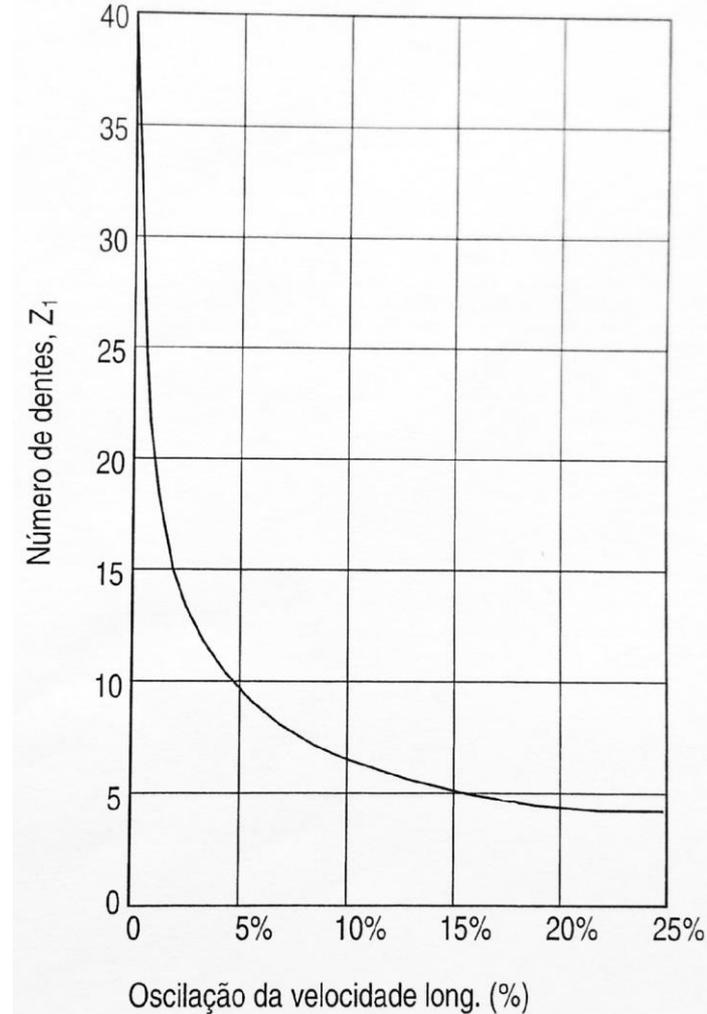


Fig. 13 Influência de Z_1 na velocidade longitudinal

Variação da Velocidade Transversal – v_2

A **velocidade transversal** da corrente é dada por

$$v_2 = v \operatorname{sen} \delta$$

Como a cada rotação de um ângulo AOB corresponde uma variação de δ entre π/Z_1 e $-\pi/Z_1$, ocorrem as seguintes **variações de v_2**

em A: $v_2 = v \operatorname{sen} \frac{\pi}{Z_1}$

em A': $v_2 = 0$

em B: $v_2 = -v \operatorname{sen} \frac{\pi}{Z_1}$

Como

$$v = \frac{\pi D_1 n_1}{60} \quad D_1 = \frac{p}{\operatorname{sen} \frac{\pi}{Z_1}}$$

então

$$\Delta v_2 = 2v \operatorname{sen} \frac{\pi}{Z_1} = \frac{2\pi n_1}{60} \frac{p}{\operatorname{sen} \frac{\pi}{Z_1}} \operatorname{sen} \frac{\pi}{Z_1} = \omega p$$

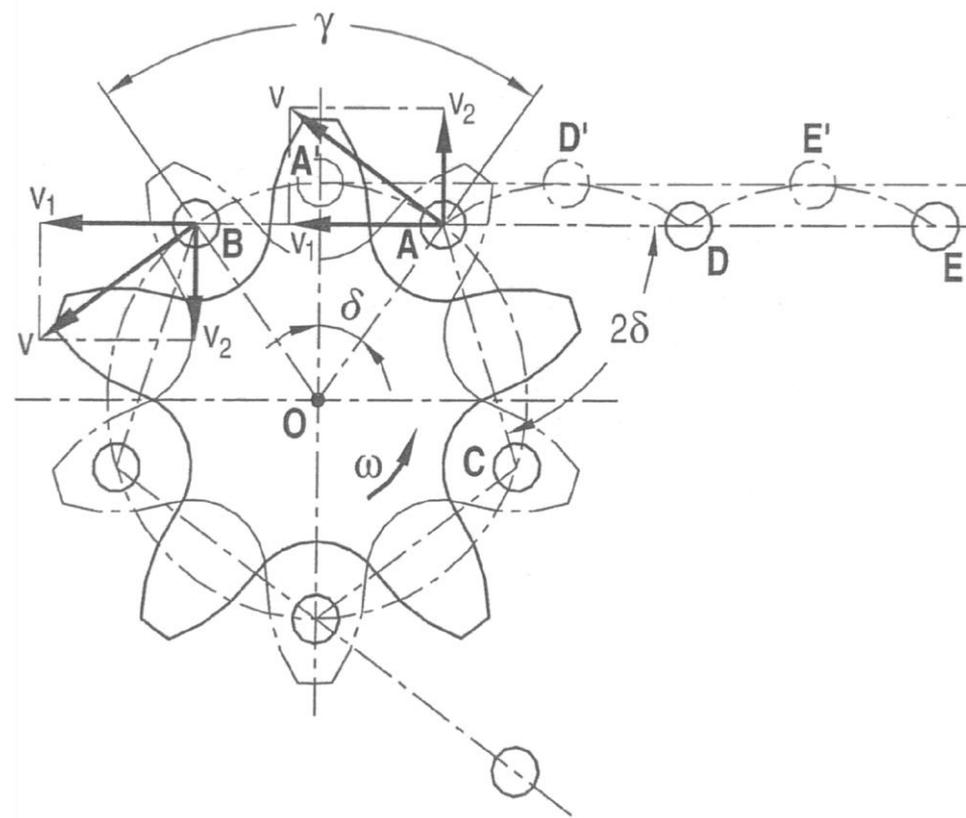


Fig. 14 Engrenamento da corrente com o pinhão

Variação da Velocidade Transversal – v_2

Finalmente, a **variação da velocidade transversal da corrente** é dada por

$$\Delta v_2 = \omega p$$

Observa-se, pois, que a variação transversal da corrente depende apenas da **velocidade angular do pinhão** e do **passo da corrente**. A figura 15 ilustra o movimento de uma corrente ao entrar em contacto com o pinhão.

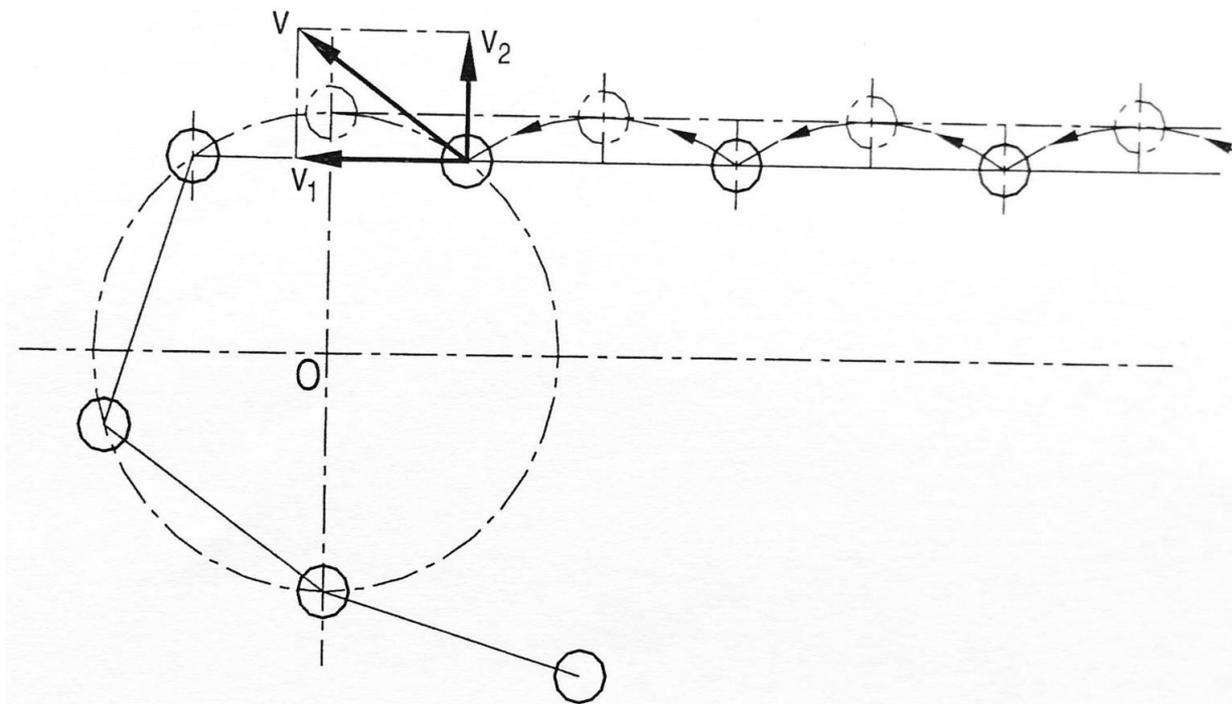


Fig. 15 Movimento de uma corrente ao entrar em contacto com o pinhão

Choques, Velocidade Média e Relação de Transmissão

Para **reduzir o choque no início do engrenamento** de cada articulação é necessário reduzir a velocidade angular do pinhão ou diminuir o passo da corrente. Assim, pode concluir-se que

- Os **choques** são tanto maiores quanto maiores forem o passo da corrente e a velocidade angular do pinhão. Os choques são essencialmente absorvidos pelos rolos da corrente
- As **variações de velocidade** linear da corrente são tanto maiores quanto menor for o número de dentes do pinhão
- Nas **vibrações transversais**, a amplitude de vibração é tanto maior quanto menor for o número de dentes do pinhão
- Um **número de dentes elevado** para o pinhão resulta numa vida mais longa da corrente
- **Maiores diâmetros** das rodas, para um mesmo passo, originam menores esforços no ramo tenso.

A **velocidade média** de uma corrente v_m pode ser calculada pelo comprimento da corrente que passa numa das rodas por unidade de tempo

$$v_m = \frac{pZ_1n_1}{60} = \frac{pZ_2n_2}{60}$$

A **relação de transmissão** i não pode ser calculada em termos do quociente entre diâmetros primitivos, mas sim pela seguinte expressão

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

Elementos a Selecionar

A seleção de uma corrente de rolos consiste em definir os seguintes elementos

- **Passo** da corrente
- **Tipo de corrente** (simples, dupla e tripla)
- **Comprimento** da corrente expresso em número de elos
- **Número de dentes** do pinhão e da roda
- **Entre-eixo** exato
- **Tipo de lubrificação** recomendada.



Fig. 16 Fabricante de correntes

Para o efeito, é necessário saber

- **Potência a transmitir**
- **Velocidade de rotação** do pinhão e da roda
- **Condições de funcionamento**
- Valor aproximado da **distância entre eixos**.

No projeto e seleção de correntes devem ser **seguidas as instruções fornecidas pelos fabricantes**, uma vez que as correntes podem apresentar características diferentes de fabricante para fabricante. Este assunto será objeto de estudo detalhado nas aulas teórico-práticas.

Lubrificação

As correntes devem ser **lubrificadas com regularidade** e com o método apropriado às condições de funcionamento. Caso assim não aconteça, as **articulações desgastar-se-ão** rapidamente. Por outro lado, o **atrito** que se gera sem lubrificação origina grande **perda de potência** devido ao calor produzido.

O **lubrificante** deve ser um **óleo mineral puro** com viscosidade escolhida de acordo com a temperatura ambiente, e de acordo com a seguinte tabela

Temperatura ambiente [°C]	Classificação SAE
-5 a 25	SAE 30
25 a 45	SAE 40
45 a 56	SAE 50

O **tipo de lubrificação** a adotar depende da **potência** a transmitir e da **velocidade** linear da corrente, tal como se evidencia na seguinte tabela

Modo de lubrif.	I. Manual	II. Gota a gota	III. Banho de óleo	IV. Reservatório e bomba de óleo
Potências	Baixas	Até 37 kW	Até 37 kW	Quaisquer condições
Velocidades	Baixas	Até 6 m/s	Até 10 m/s	(potências superiores a 37 kW)

Lubrificação

O modo de lubrificação das correntes pode ser escolhido a partir dos diagramas de potência e de velocidade, tal como o que se ilustra na figura 17.

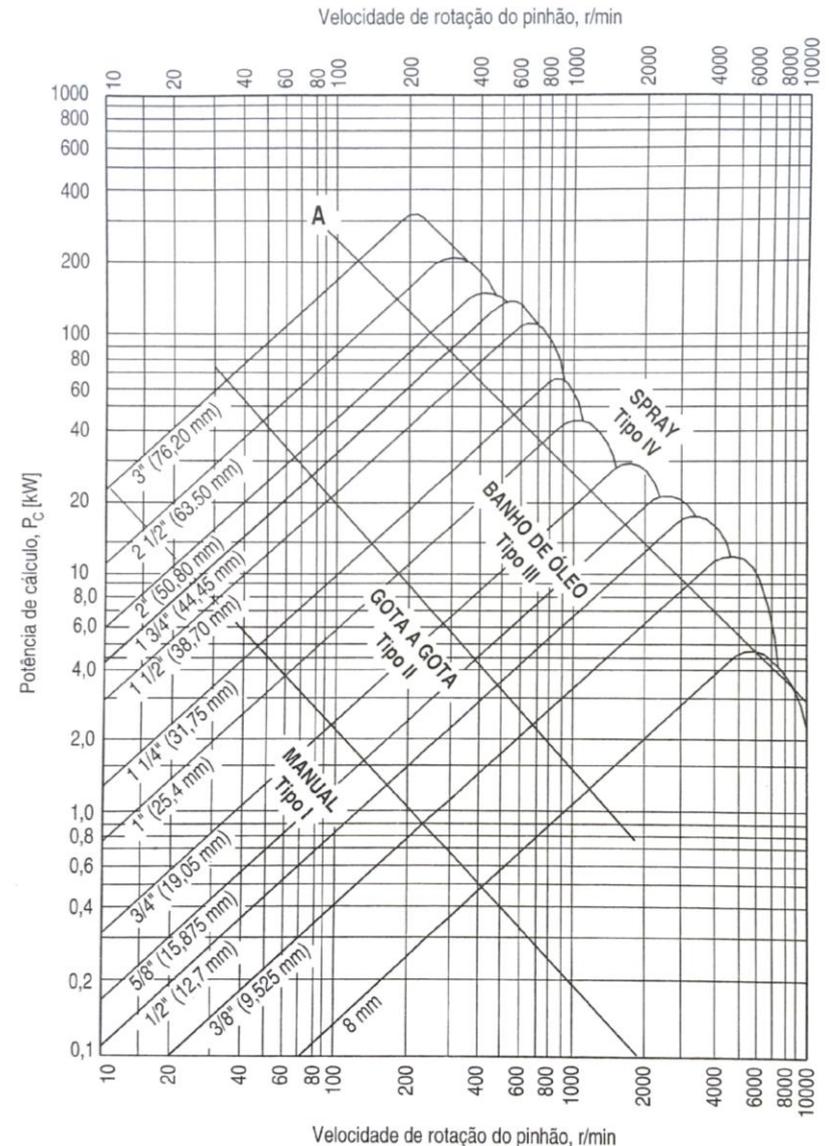
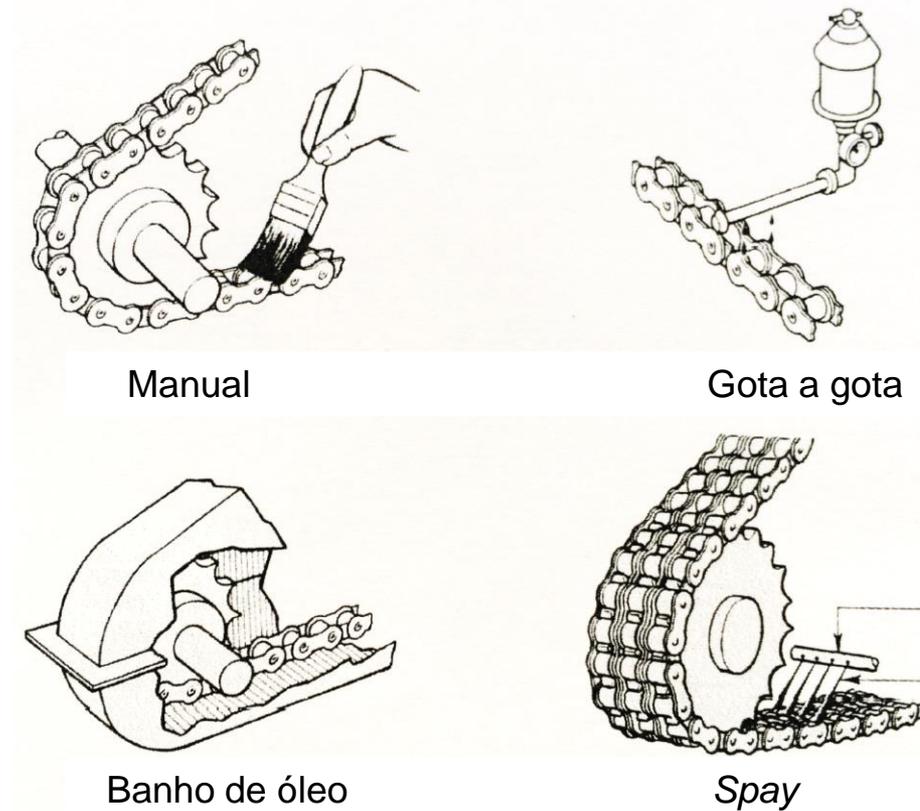


Fig. 17 Modos de lubrificação de correntes: (a) Manual; (b) Gota a gota; (c) Banho de óleo; (d) Spray



Manutenção e Montagem

A **manutenção** de uma transmissão por corrente consiste simplesmente em **garantir que**

- As **condições de montagem** não sejam modificadas
- A **lubrificação** seja suficiente.

A **montagem** correta de uma transmissão por correntes é relativamente simples. No entanto, importa observar os seguintes aspetos

- Os veios do pinhão e da roda devem ser paralelos e preferencialmente horizontais
- O pinhão e a roda não devem ter excentricidade para evitar vibrações
- O alinhamento da roda e do pinhão deve ser medido com uma régua
- A corrente deve ser colocada em funcionamento sem pré-tensão
- A flecha nunca deve exceder 2% do entre-eixo
- Em caso de disposição vertical, deve assegurar-se que a corrente é suficientemente tendida de forma a engrenar corretamente nos dentes do pinhão.

Manutenção e Montagem

A figura 18 ilustra o modo de **alinhamento do pinhão e da roda** com auxílio de uma régua e de um nível.

A figura 19 mostra a regulação para efetuar **o ajustamento da transmissão** de forma a garantir uma montagem correta e a permitir a compensação do desgaste.

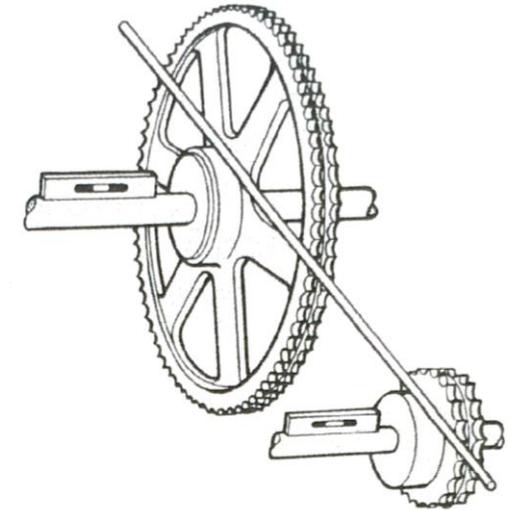


Fig. 18 Alinhamento do pinhão e da roda

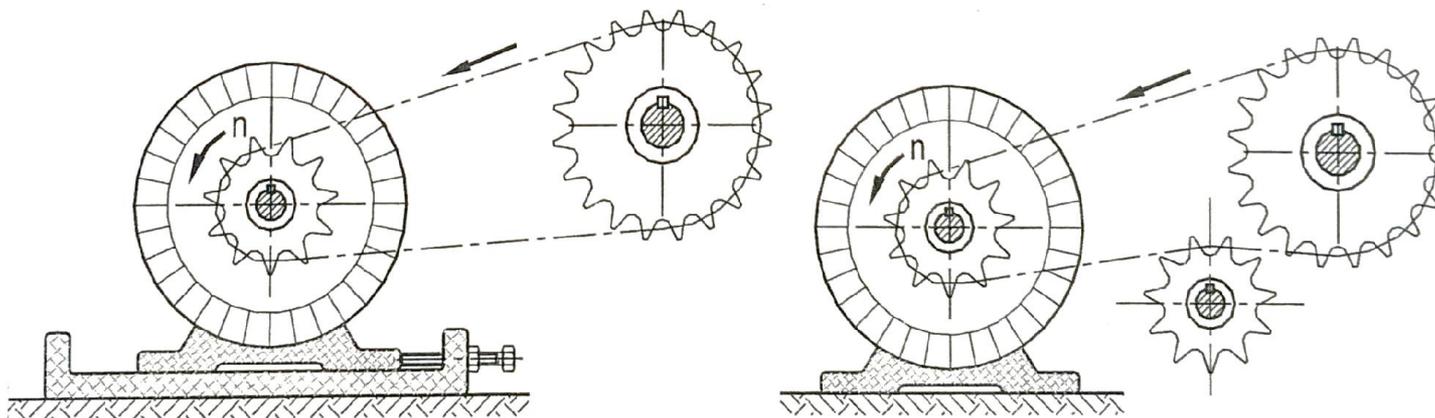


Fig. 19 Ajustamento de correntes: Deslocamento do entre-eixo e aplicação de uma tensão

Tipos de Solicitações

Nas correntes devem ser consideradas as **forças centrífugas** e as **forças de catenária** (devido ao peso próprio). Tal como as correias dentadas, as correntes não necessitam de pré-tensão. Na figura 20 estão representadas as diversas forças que atuam num engrenamento por corrente.

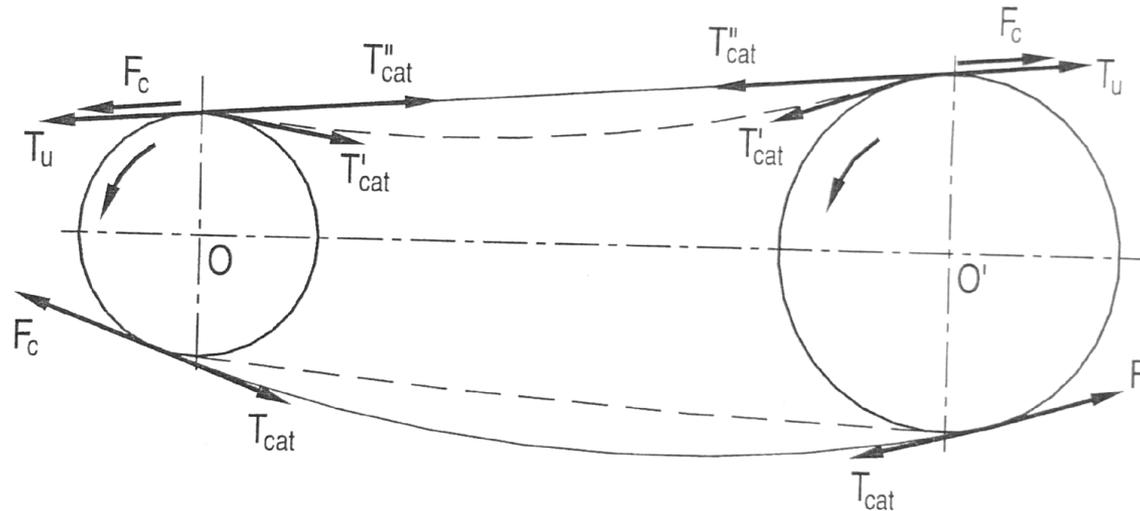


Fig. 20 Forças que atuam nos ramos de uma corrente

Com a transmissão em movimento, a corrente está sujeita às seguintes forças no **ramo tenso**: (i) a força útil devido à **transmissão de potência** (T_u), e (ii) a força resultante da **aceleração centrífuga** dos elos engrenados (F_c).

Com a transmissão em movimento, a corrente está sujeita às seguintes forças no **ramo bambo**: (i) a força **centrífuga** (F_c), e (ii) a força devido ao **peso próprio** (F_{cat}) da parte livre da corrente devido ao efeito de catenária.

Tipos de Solicitações

Com a **transmissão parada**, as rodas motora e movida podem mover-se em qualquer sentido. Assim, as duas porções livres da corrente tomam uma forma encurvada devido ao efeito de catenária e ficam sujeitas a esforços representados, na figura, 20 por T_{cat} e T'_{cat} que se equilibram mutuamente.

Pondo a **transmissão em movimento**, o pinhão motor criará na corrente uma tensão T_u , sob a ação desta força, a corrente será posta sob tensão e a roda movida reagirá com uma força de frenagem oposta a T_u .

Logo que a **corrente atinga a sua posição de equilíbrio**, o ramo tenso, devido à ação de catenária, será submetido a uma força T''_{cat} nas extremidades do ramo tenso no pinhão e na roda. Esta força T''_{cat} é diretamente oposta à força T_u e à força F_c , pelo que qualquer ponto do ramo tenso estará apenas sujeito ao efeito de catenária que equilibra as outras duas forças diretamente opostas.

Pode, então dizer-se que o meio de transmissão de potência através do **ramo tenso** entre a roda motora e a roda movida é a força de catenária T''_{cat} vindo então que

$$T''_{cat} = T_u + F_c$$

Contrariamente, sobre o **ramo bambo**, o esforço F_c equilibra parcialmente o esforço T_{cat} , sendo a diferença equilibrada pela reação do último dente engrenado sobre as rodas. Portanto, os esforços no ramo tenso T_1 e no ramo bambo T_2 são dados por

$$T_1 = T_u + F_c$$

$$T_2 = F_c + T_{cat}$$

Força Útil, Força Centrífuga e Força de Catenária

A **força útil** (T_u) é a única força responsável pela transmissão de potência e é dada por

$$T_u = \frac{P}{v_m}$$

A **força centrífuga** é expressa do seguinte modo

$$F_c = \frac{qv_m^2}{g} = \frac{qZ^2n^2p^2}{36000 \cdot 10^6}$$

F_c – Força centrífuga [N]

q – Peso por unidade de comprimento [kgf/m]

Z – Número de dentes da roda considerada

n – Velocidade de rotação da roda considerada [rpm]

p – Passo da corrente [mm]

A **força de catenária** é calculada da seguinte forma

$$F_{cat} = \frac{qC^2}{8000f} + \frac{qf}{2000} \quad f = \sqrt{0,5C(L_r - L)}$$

q – Peso por unidade de comprimento [kgf/m]

C – Entre-eixo [mm]

f – Flecha [mm]

L_r e L – Comprimento real e teórico da corrente [mm]

Avarias Típicas em Correntes

A figura 21 ilustra alguns [exemplos de avarias típicas](#) em sistemas de transmissão por correntes.

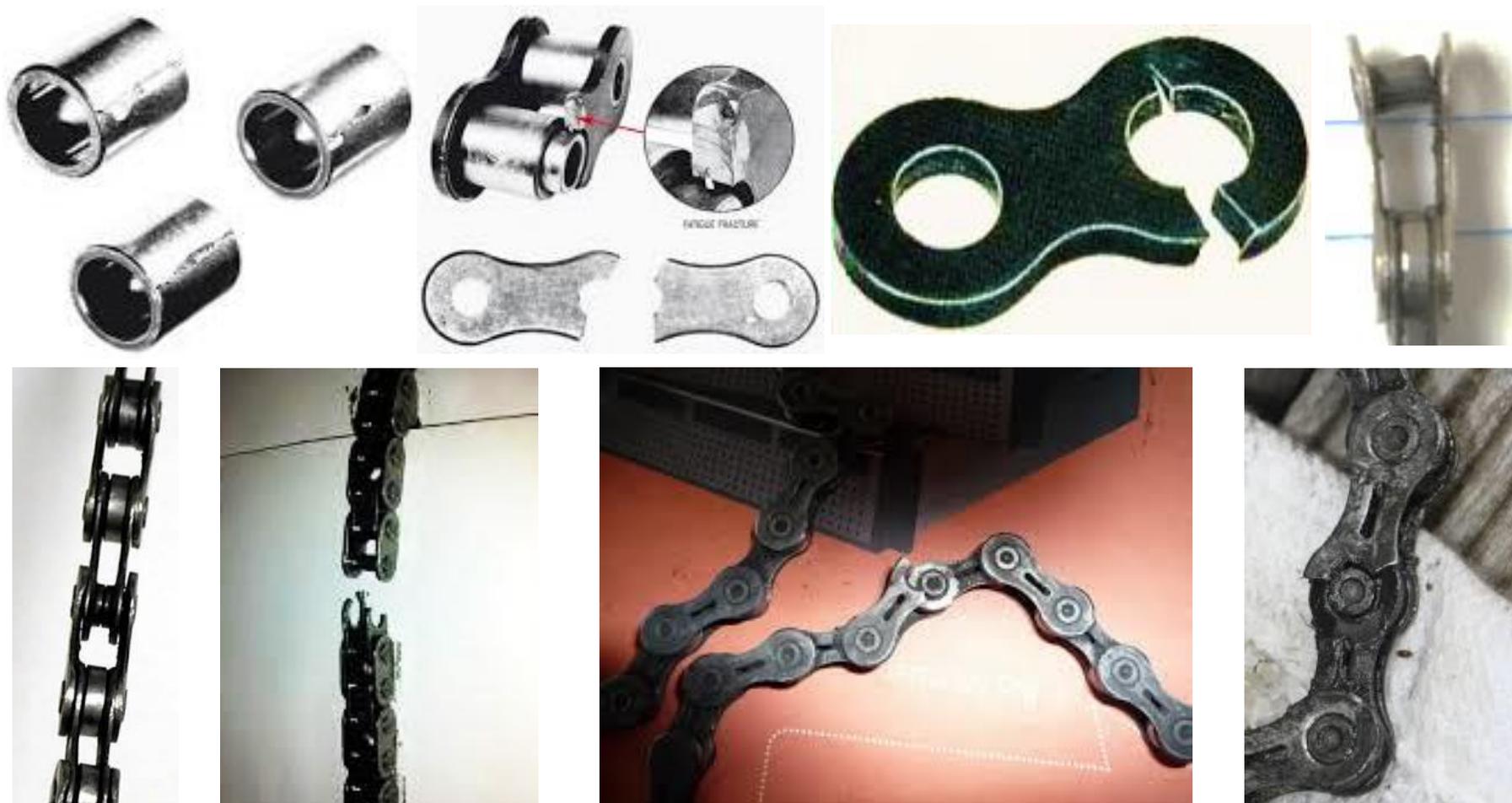


Fig. 21 Exemplos de falhas e avarias em sistemas de transmissão por correntes.

Bibliografia Recomendada

Apresentam-se em seguida as [principais fontes bibliográficas](#) utilizadas na preparação deste documento:

- Branco, C.M., Ferreira, J.M., da Costa, J.D., Ribeiro, A.S. (2009) *Projecto de Órgãos de Máquinas*. 2ª Edição, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.
- Catálogo de Correntes Refª REN8/ENG/17/98/5K/2 (1998) *Renold Power Transmission Limited*.
- Juvinall, R.C., Marshek, K.M. (2006) *Fundamentals of Machine Component Design*. John Wiley and Sons, New York.
- Niemann, G. (1971) *Elementos de Máquinas*. Volume II, Editora Edgard Blucher Ltda, São Paulo, Brasil .
- Norton, R.L. (2013) *Machine Design*. Pearson Education, New York .
- Shigley, J.E., Mischke, C.R. (1989) *Mechanical Engineering Design*. 5th Edition, McGraw-Hill, New York
- Spotts, M.F., Shoup, T.E. (1998) *Design of Machine Elements*. 7th Edition Prentice-Hall, New Jersey.