

4. Cálculo de carga dos rolamentos

Para calcular as cargas dos rolamentos, deve-se determinar as forças que atuam sobre o eixo que é suportado pelos rolamentos. Estas forças incluem o peso morto inerente ao corpo giratório, a carga produzida quando a máquina realiza um trabalho e a carga produzida por ação da força dinâmica de transmissão. Teoricamente, as cargas podem ser calculadas, mas o cálculo é difícil na maioria dos casos.

Um método de cálculo de cargas que atuam sobre o eixo que transmite força dinâmica, sendo esta a principal aplicação, é mostrada abaixo.

4.1 Cargas que atuam no eixo

4.1.1 Fator de carga

Há inúmeros casos onde a carga operacional real sobre o eixo, é muito maior do que a carga teórica calculada, devido a vibração ou choques. A carga real do eixo, pode ser calculada conforme a formula (4.1).

$$K = f_w \cdot K_c \dots\dots\dots (4.1)$$

Onde:

- K : Carga real sobre o eixo N {kgf}
- f_w : Fator de carga (Tabela 4.1)
- K_c : Valor teórico calculado N {kgf}

Tabela 4.1 Fator de carga f_w

Intensidade de choque	f_w	Aplicação
Muito baixo ou sem choque	1.0~1.2	Máquinas elétricas sem choque, máquinas ferramentas, instrumentos de medição.
Choques leves	1.2~1.5	Veículos ferroviários, automóveis, moinhos de rolos, máquinas para trabalhar metal, máquinas para fabricar papel, máquinas para misturar borracha, impressoras, aeronaves, máquinas têxteis, unidades elétricas, máquinas para escritório.
Choques pesados	1.5~3.0	Trituradores, equipamentos agrícolas, equipamentos de construção, guindastes.

4.1.2 Cargas de engrenamento

As cargas que atuam sobre engrenagens podem dividir-se em três tipos principais segundo a direção na qual se aplica a carga: tangencial (K_t), radial (K_s), e axial (K_a).

A magnitude e direção dessas cargas variam segundo os tipos de engrenagens. O método de cálculo de cargas, informado a seguir, é para dois tipos de engrenagens e arranjos de uso geral: Engrenagens para eixos paralelos e engrenagens para eixos transversais. Para métodos de cálculo referentes a outros tipos de arranjos de engrenagens e eixos, favor consultar a Engenharia da NTN.

(1) Cargas atuantes em engrenagens sobre eixos paralelos

As forças que atuam sobre as engrenagens retas e helicoidais em eixos paralelos, estão indicadas nas **figs. 4.1, 4.2 e 4.3**. A magnitude das cargas pode ser determinada usando as equações (4.2) a (4.5).

$$\left. \begin{aligned} K_t &= \frac{19.1 \times 10^6 \cdot H}{D_p \cdot n} \quad \text{N} \\ &= \frac{1.95 \times 10^6 \cdot H}{D_p \cdot n} \quad \text{kgf} \end{aligned} \right\} \dots\dots (4.2)$$

$$K_s = K_t \cdot \tan \alpha \quad (\text{dentes retos}) \dots\dots\dots (4.3a)$$

$$= K_t \cdot \frac{\tan \alpha}{\cos \beta} \quad (\text{dentes helicoidais}) \dots\dots (4.3b)$$

$$K_r = \sqrt{K_t^2 + K_s^2} \dots\dots\dots (4.4)$$

$$K_a = K_t \cdot \tan \beta \quad (\text{dentes retos}) \dots\dots\dots (4.5)$$

Onde:

- K_t : Carga tangencial da engrenagem (força tangencial), N {kgf}
- K_s : Carga radial da engrenagem (força de separação), N {kgf}
- K_r : Carga do eixo em ângulo reto (força resultante da força tangencial e da força de separação), N {kgf}
- K_a : Carga paralela ao eixo, N {kgf}
- H : Força de transmissão, kW
- n : Rotação, rpm
- D_p : Diâmetro do passo da engrenagem, mm
- α : Ângulo de pressão da engrenagem, °
- β : Ângulo da hélice, °

Como a carga real da engrenagem também contém vibrações e cargas de choque, as cargas teóricas obtidas com as equações anteriores devem ser ajustadas pelo fator de engrenagem f_z , conforme indicado na **tabela 4.2**.

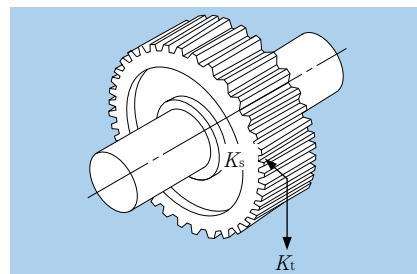


Fig. 4.1 Cargas de engrenagens retas

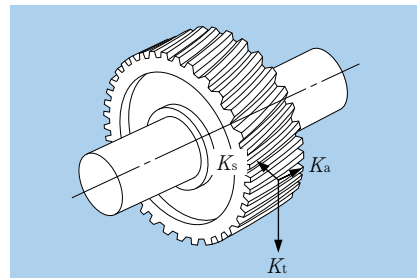


Fig. 4.2 Cargas de engrenagens helicoidais

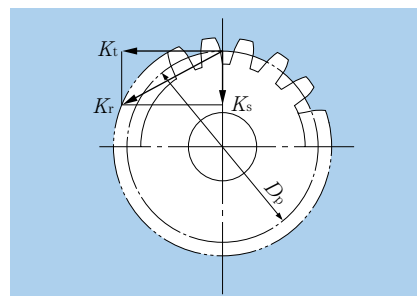


Fig. 4.3 Força radial resultante

Tabela 4.2 Fator de engrenagem f_z

Tipo de engrenagem	f_z
Engrenagens com retífica de precisão (Erros no passo e no perfil do dente inferior a 0,02 mm)	1.05~1.1
Engrenagens torneadas de acabamento ordinário (Erros no passo e no perfil do dente inferior a 0,1 mm)	1.1~1.3

(2)Cargas atuantes sobre eixos transversais

As cargas que atuam sobre engrenagens cônicas de dentes retos e sobre engrenagens cônicas espirais em eixos transversais estão indicadas nas **figs. 4.4 e 4.5**. Os métodos de cálculo para se obter estas cargas nas engrenagens estão indicadas na **tabela 4.3**. Para o cálculo das cargas nas engrenagens cônicas de dentes retos, pode-se aplicar o ângulo da hélice $\beta = 0$. Os símbolos e unidades usados na **tabela 4.3** são os seguintes:

- K_t : Carga tangencial da engrenagem (força tangencial), N {kgf}
- K_s : Carga radial da engrenagem (força de separação), N {kgf}
- K_a : Carga paralela ao eixo, N {kgf}
- H : Força de transmissão, kW
- n : Rotação, rpm
- D_{pm} : Diâmetro médio do passo, mm
- α : Ângulo de pressão da engrenagem, °
- β : Ângulo da hélice, °
- δ : Ângulo do passo do cone, °

Devido à intersecção de dois eixos, a relação de carga entre pinhão e coroa é dada por:

$$K_{sp} = K_{ag} \dots \dots \dots (4.6)$$

$$K_{ap} = K_{sg} \dots \dots \dots (4.7)$$

onde,

- K_{sp}, K_{sg} : Força de separação do pinhão e da coroa (engrenagem), N {kgf}
- K_{ap}, K_{ag} : Carga axial do pinhão e da coroa (engrenagem), N {kgf}

Para engrenagens cônicas espirais, o sentido da carga varia em função da direção do ângulo da hélice, do sentido de rotação, e de qual é o lado motor e o lado movido. O sentido da força de separação (K_s) e da carga axial (K_a), indicado na **fig. 4.5** é positivo. O sentido de rotação e de direção do ângulo da hélice são definidos ao serem vistos pelo lado da engrenagem de diâmetro maior. O sentido de rotação da engrenagem da **fig. 4.5** é assumido como horário (direito).

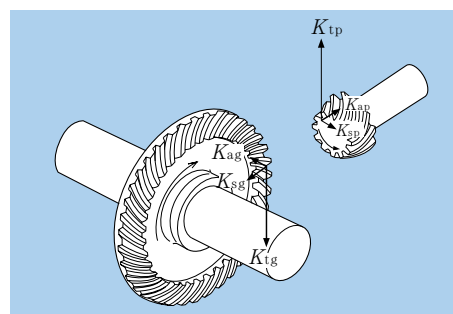


Fig. 4.4 Cargas sobre engrenagens cônicas

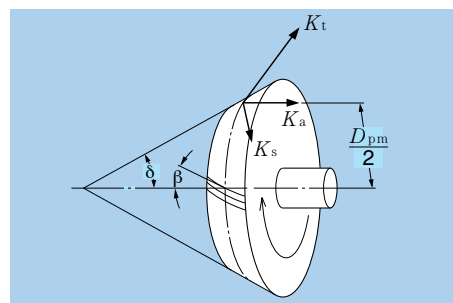


Fig. 4.5 Diagramas de engrenagens cônicas

Tabela 4.3 Cargas que atuam sobre as engrenagens cônicas

Tipos de cargas	Sentido de rotação	Horário	Anti-horário	Horário	Anti-horário
	Direção da hélice	Direito	Esquerdo	Esquerdo	Direito
Carga tangencial K_t		$K_t = \frac{19.1 \times 10^6 \cdot H}{D_{pm} \cdot n}, \left\{ \frac{1.95 \times 10^6 \cdot H}{D_{pm} \cdot n} \right\}$			
Carga Radial (força de separação) K_s	Lado motor	$K_s = K_t \left[\tan \alpha \frac{\cos \delta}{\cos \beta} + \tan \beta \sin \delta \right]$		$K_s = K_t \left[\tan \alpha \frac{\cos \delta}{\cos \beta} - \tan \beta \sin \delta \right]$	
	Lado movido	$K_s = K_t \left[\tan \alpha \frac{\cos \delta}{\cos \beta} - \tan \beta \sin \delta \right]$		$K_s = K_t \left[\tan \alpha \frac{\cos \delta}{\cos \beta} + \tan \beta \sin \delta \right]$	
Carga axial K_a	Lado motor	$K_a = K_t \left[\tan \alpha \frac{\sin \delta}{\cos \beta} - \tan \beta \cos \delta \right]$		$K_a = K_t \left[\tan \alpha \frac{\sin \delta}{\cos \beta} + \tan \beta \cos \delta \right]$	
	Lado movido	$K_a = K_t \left[\tan \alpha \frac{\sin \delta}{\cos \beta} + \tan \beta \cos \delta \right]$		$K_a = K_t \left[\tan \alpha \frac{\sin \delta}{\cos \beta} - \tan \beta \cos \delta \right]$	

4.1.3 Carga sobre o eixo devido a correias /correntes

As cargas tangenciais sobre as rodas dentadas ou polias podem ser calculadas pela equação (4.8).

$$K_t = \frac{19.1 \times 10^6 \cdot H}{D_p \cdot n} \quad \text{N} \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} \dots\dots\dots (4.8)$$

$$= \frac{1.95 \times 10^6 \cdot H}{D_p \cdot n} \quad \text{kgf}$$

Onde,

- K_t : Cargas tangenciais, N {kgf}
- H : Potência transmitida, kW
- D_p : Diâmetro do passo da roda dentada/polia, mm

Para transmissões de potência por correias se aplica uma tensão inicial para manter constante a tensão de operação na polia e na correia. Levando-se em conta esta tensão, as cargas radiais que atuam nas polias são obtidas através da equação (4.9). Para transmissões de potência por corrente, a mesma equação pode ser usada se as cargas de vibração e choque são levadas em consideração.

$$K_r = f_b \cdot K_t \dots (4.9)$$

onde,

- K_r : Carga radial na roda dentada ou polia, N {kgf}
- f_b : Fator de corrente ou correia (**Tabela 4.4**)

Tabela 4.4 Fator de corrente ou correia f_b

Tipo da corrente ou da correia	f_b
Corrente simples	1.2~1.5
Correia em V	1.5~2.0
Correia de tempo	1.1~1.3
Correia plana (com polia tensionadora)	2.5~3.0
Correia plana	3.0~4.0

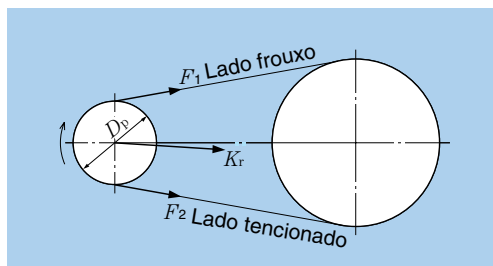


Fig. 4.6 Cargas em correntes / correias

4.2 Distribuição da carga sobre os rolamentos

Para sistemas de eixos, se considera que a tensão estática é recebida através dos rolamentos e qualquer carga atuante sobre o eixo é distribuída sobre os rolamentos.

Por exemplo, no conjunto de eixo e engrenagem representado na fig. 4.7 as cargas aplicadas sobre os rolamentos podem ser determinadas mediante o uso das equações (4.10) e (4.11).

Este é um exemplo simples, mas normalmente tais cálculos são complexos.

$$F_{rA} = \frac{a+b}{b} F_I + \frac{d}{c+d} F_{II} \dots\dots\dots (4.10)$$

$$F_{rB} = -\frac{a}{b} F_I + \frac{c}{c+d} F_{II} \dots\dots\dots (4.11)$$

onde,

- F_{rA} : Carga radial no rolamento A, N {kgf}
- F_{rB} : Carga radial no rolamento B, N {kgf}
- F_I, F_{II} : Carga radial no eixo, N {kgf}

Se as direções de carga radial forem diferentes, a soma vetorial de cada carga deve ser determinada.

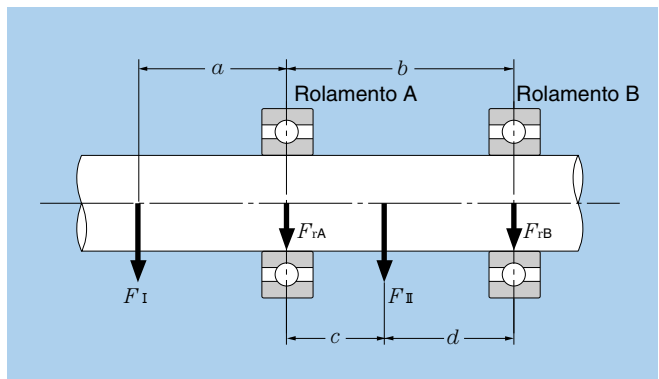


Fig. 4.7 Eixo de engrenagem

4.3 Carga média

Em muitos casos, em circunstância normais, a carga sobre os rolamentos utilizados em máquinas irá flutuar em função de um período de tempo fixo, ou de uma jornada de trabalho programada. A carga sobre os rolamentos que operam sob estas condições pode ser convertida em uma carga média (F_m); esta é uma carga que dá aos rolamentos a mesma vida que teriam sob condições de operação constantes.

(1) Carga flutuante escalonada

A carga média dos rolamentos, F_m , para cargas escalonadas, se calcula através da equação (4.12). F_1, F_2, \dots, F_n são as cargas que atuam sobre o rolamento; n_1, n_2, \dots, n_n e t_1, t_2, \dots, t_n são as rotações do rolamento e os tempos de operação respectivamente

$$F_m = \left[\frac{\sum (F_i^p n_i t_i)}{\sum (n_i t_i)} \right]^{1/p} \dots \dots \dots (4.12)$$

onde:

- $p = 3$ para rolamentos de esferas
- $p = 10/3$ para rolamentos de rolos

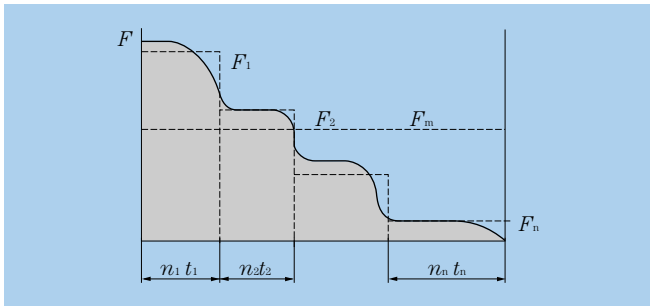


Fig. 4.8 Carga escalonada

(2) Carga de série consecutiva

Quando é possível exprimir a função $F(t)$ em termos de carga cíclica t_o e do tempo t , a carga média é determinada através da equação (4.13)

$$F_m = \left[\frac{1}{t_o} \int_0^{t_o} F(t)^p dt \right]^{1/p} \dots \dots \dots (4.13)$$

where:

- $p = 3$ para rolamentos de esferas
- $p = 10/3$ para rolamentos de rolos

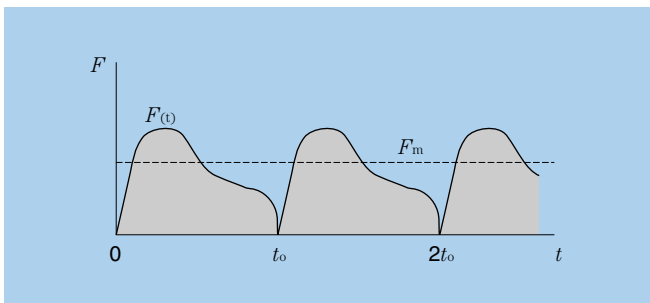


Fig. 4.9 Carga de série em função do tempo

(3) Carga flutuante linear

A carga média, F_m , pode ser aproximada pela equação (4.14)

$$F_m = \frac{F_{min} + 2F_{max}}{3} \dots \dots \dots (4.14)$$

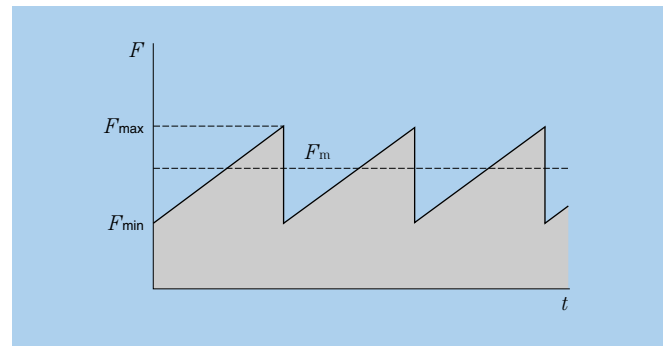


Fig. 4.10 Carga linear flutuante

(4) Carga flutuante senoidal

A carga média, F_m pode ser aproximada pelas equações (4.15) e (4.16).

caso (a) $F_m = 0.75 F_{max} \dots \dots \dots (4.15)$

caso (b) $F_m = 0.65 F_{max} \dots \dots \dots (4.16)$

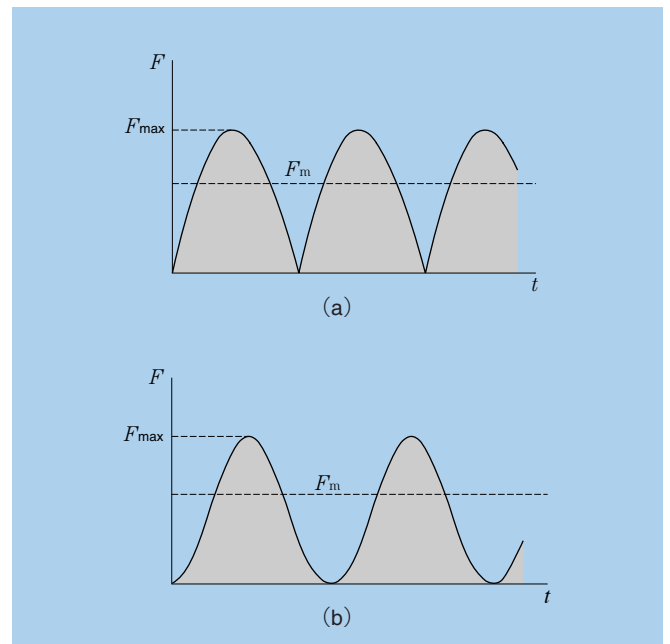


Fig. 4.11 Carga variável senoidal

4.4 Carga equivalente

4.4.1 Carga dinâmica equivalente

Quando as cargas dinâmicas radiais e cargas dinâmicas axiais atuam sobre um rolamento ao mesmo tempo, a carga hipotética que atua sobre o centro dos rolamentos e que lhes dá a mesma vida como se tivessem somente carga radial ou somente axial, se denomina carga dinâmica equivalente.

Para rolamentos radiais, esta carga se expressa como carga radial pura e é denominada carga radial dinâmica equivalente. Para rolamentos axiais, se expressa como carga axial pura, e é denominada carga axial dinâmica equivalente.

(1) Carga radial dinâmica equivalente

A carga radial dinâmica equivalente é expressa pela equação (4.17).

$$P_r = X F_r + Y F_a \dots \dots \dots (4.17)$$

onde,

- P_r : Carga radial dinâmica equivalente, N {kgf}
- F_r : Carga radial atuante, N {kgf}
- F_a : Carga axial atuante N {kgf}
- X : Fator de carga radial
- Y : Fator de carga axial

Os valores para X e Y estão listados nas tabelas de rolamentos.

(2) Carga axial dinâmica equivalente

Como regra geral, os rolamentos axiais padronizados com contato angular de 90° não podem suportar cargas radiais. Entretanto, rolamentos axiais autocompensadores de rolos podem suportar uma parcela de carga radial. A carga axial dinâmica equivalente para estes rolamentos é determinada pela equação (4.18).

$$P_a = F_a + 1.2 F_r \dots \dots \dots (4.18)$$

onde,

- P_a : Carga axial dinâmica equivalente, N {kgf}
 - F_a : Carga axial atuante, N {kgf}
 - F_r : Carga radial atuante, N {kgf}
- Desde que $F_r / F_a \leq 0.55$ somente.

4.4.2 Carga estática equivalente

A carga estática equivalente é uma carga hipotética que poderia causar a mesma deformação permanente total nos pontos de contato de maior esforço entre os corpos rolantes e as pistas como se fosse sob as condições reais de uma carga atuante; Esta situação se dá quando as cargas radiais estáticas e as cargas axiais estáticas atuam simultaneamente sobre o rolamento.

Para rolamentos radiais esta carga hipotética se refere a cargas radiais puras e para rolamentos axiais se refere a cargas axiais puras e centradas. Estas cargas são denominadas cargas radiais estáticas equivalentes e cargas axiais estáticas equivalentes, respectivamente.

(1) Carga radial estática equivalente

Para rolamentos radiais a carga radial estática equivalente pode ser determinada através das equações (4.19) ou (4.20).

O maior dos dois resultados é o valor utilizado para P_{or} .

$$P_{or} = X_o F_r + Y_o F_a \dots \dots \dots (4.19)$$

$$P_{or} = F_r \dots \dots \dots (4.20)$$

onde,

- P_{or} : Carga radial estática equivalente, N {kgf}
- F_r : Carga radial atuante, N {kgf}
- F_a : Carga axial atuante, N {kgf}
- X_o : Fator de carga estática radial
- Y_o : Fator de carga estática axial

Os valores para X_o e Y_o estão listados nas respectivas tabelas de rolamentos.

(2) Carga axial estática equivalente

Para rolamentos axiais autocompensadores de rolos, a carga axial estática equivalente é expressa pela equação (4.21).

$$P_{oa} = F_a + 2.7 F_r \dots \dots \dots (4.21)$$

onde,

- P_{oa} : Carga axial estática equivalente, N {kgf}
 - F_a : Carga axial atuante, N {kgf}
 - F_r : Carga radial atuante, N {kgf}
- Desde que $F_r / F_a \leq 0.55$ somente.

4.4.3 Cálculo da carga para rolamentos de esferas de contato angular e rolamentos de rolos cônicos

Para rolamentos de esferas de contato angular e rolamentos de rolos cônicos, o ápice do cone de pressão (centro de carga) está localizado conforme indicado na **fig. 4.12**, e seus valores estão listados nas tabelas de rolamentos.

Quando cargas radiais atuam sobre estes tipos de rolamentos, um componente de força é induzido na direção axial. Por esta razão, estes rolamentos são aplicados em pares (arranjo DB ou DF). Este componente de força deve ser considerado para o cálculo de carga e se expressa conforme a equação (4.22)

$$F_a = \frac{0.5 F_r}{Y} \dots \dots \dots (4.22)$$

onde,

- F_a : Carga axial dinâmica equivalente, N {kgf}
- F_r : Carga radial atuante, N {kgf}
- Y : Fator de carga axial

As cargas radiais dinâmicas equivalentes para esses pares de rolamentos são dados na **tabela 4.5**.

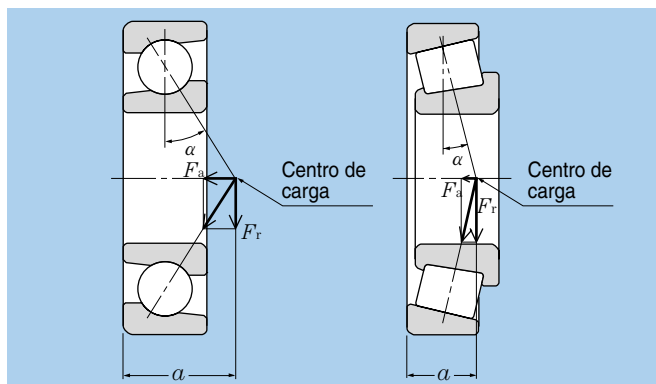


Fig. 4.12 Ápice do cone de pressão e componente de carga axial

Tabela 4.5 Disposição de rolamentos e carga dinâmica equivalente

Disposição do rolamento	Condição de carga	Carga axial	Carga radial equivalente
rolamento I rolamento II DB (Costa a costa) 	$\frac{0.5F_{rI}}{Y_I} \leq \frac{0.5F_{rII}}{Y_{II}} + F_a$	$F_{aI} = \frac{0.5F_{rII}}{Y_{II}} + F_a$ ———	$P_{rI} = XF_{rI} + Y_I \left(\frac{0.5F_{rII}}{Y_{II}} + F_a \right)$ ----- $P_{rII} = F_{rII}$
rolamento II rolamento I DF (Face a face) 	$\frac{0.5F_{rI}}{Y_I} > \frac{0.5F_{rII}}{Y_{II}} + F_a$	——— $F_{aII} = \frac{0.5F_{rI}}{Y_I} - F_a$	$P_{rI} = F_{rI}$ ----- $P_{rII} = XF_{rII} + Y_{II} \left(\frac{0.5F_{rI}}{Y_I} - F_a \right)$
rolamento I rolamento II DB (Costa a costa) 	$\frac{0.5F_{rII}}{Y_{II}} \leq \frac{0.5F_{rI}}{Y_I} + F_a$	——— $F_{aII} = \frac{0.5F_{rI}}{Y_I} + F_a$	$P_{rI} = F_{rI}$ ----- $P_{rII} = XF_{rII} + Y_{II} \left(\frac{0.5F_{rI}}{Y_I} + F_a \right)$
rolamento II rolamento I DF (Face a face) 	$\frac{0.5F_{rII}}{Y_{II}} > \frac{0.5F_{rI}}{Y_I} + F_a$	$F_{aI} = \frac{0.5F_{rII}}{Y_{II}} - F_a$ ———	$P_{rI} = XF_{rI} + Y_I \left(\frac{0.5F_{rII}}{Y_{II}} - F_a \right)$ ----- $P_{rII} = F_{rII}$

Nota 1: Aplicável para pré-carga zero.

2: Forças radiais em sentido oposto ao indicado na ilustração acima também são consideradas como positivas.

4.5 Vida nominal e exemplos de cálculo da vida

Nos exemplos dados nesta seção, para o propósito de cálculo, todos os fatores de carga hipotética, bem como todos os fatores de carga calculados, podem estar presumidamente incluídos como resultante dos valores de carga.

(Exemplo 1)

Qual é a vida nominal em horas de operação (L_{10h}) para o rolamento de esferas **6208**, operando a velocidade de rotação $n = 650$ rpm, com uma carga radial F_r de 3.2 kN?

Conforme a fórmula 4.17, a carga radial dinâmica equivalente é:

$$P_r = F_r = 3.2 \text{ kN} \quad \{326 \text{ kgf}\}$$

A capacidade de carga dinâmica C_r para o rolamento 6208 da página B-12 é 29.1 kN; O fator de rotação f_n para rolamentos de esferas $n = 650$ rpm da **figura 3.1** é $f_n = 0.37$. Assim sendo, o fator de vida f_h , conforme a fórmula é:

$$f_h = f_n \frac{C_r}{P_r} = 0.37 \times \frac{29.1}{3.2} = 3.36$$

Portanto, com $f_h = 3.36$ da **figura 3.1**, a vida nominal L_{10h} , é de aproximadamente 19,000 horas.

(Exemplo 2)

Qual é a vida nominal L_{10h} para o mesmo rolamento nas mesmas condições do exemplo 1 acima, mas com uma carga axial adicional F_a de 1.8 kN?

Para encontrar o valor da carga radial dinâmica equivalente P_r , deve-se utilizar o fator de carga radial X e o fator de carga axial Y .

A capacidade de carga estática básica C_{or} para o rolamento 6208 informado na página B-12 é 17.8 kN e f_o é 14.0. Assim sendo:

$$\frac{f_o \cdot F_a}{C_{or}} = \frac{14 \times 1.8}{17.8} = 1.42$$

Calculando-se pelo método de interpolação proporcional, dado na pág. B-13, $e = 0.30$ para as operações de carga axial e radial:

$$\frac{F_a}{F_r} = \frac{1.8}{3.2} = 0.56 > e = 0.30$$

Conforme o dado da página B-13, $X = 0.56$ e $Y = 1.44$, portanto, a carga radial equivalente dada pela fórmula (4.17) P_r , é:

$$\begin{aligned} P_r &= XF_r + YF_a = 0.56 \times 3.2 + 1.43 \times 1.8 \\ &= 4.38 \text{ kN} \quad \{447 \text{ kgf}\} \end{aligned}$$

Da **figura 3.1** e fórmula (3.1), o fator de vida f_h é:

$$f_h = f_n \frac{C_r}{P_r} = 0.37 \times \frac{29.1}{4.38} = 2.46$$

Portanto, com o fator de vida $f_h = 2.46$, da **figura 3.1**, a vida nominal L_{10h} é de aproximadamente 7,500 horas.

(Exemplo 3)

Determine o tamanho ótimo para um rolamento de rolos cilíndricos que opera a 450 rpm, com uma carga radial, F_r de 200 kN, e que deve ter uma vida nominal superior a 20 000 horas.

Da **fig. 3.1** o fator de vida $f_h = 3.02$ (L_{10h} para 20,000), E o fator de rotação $f_n = 0.46$ ($n = 450$ rpm). Para encontrar a capacidade de carga dinâmica C_r , utiliza-se a equação (3.1).

$$\begin{aligned} C_r &= \frac{f_h}{f_n} P_r = \frac{3.02}{0.46} \times 200 \\ &= 1,313 \text{ kN} \quad \{134,000 \text{ kgf}\} \end{aligned}$$

Da tabela de rolamentos página B-106 o menor rolamento que segue todos os requisitos é o **NU2336** ($C_r = 1380$ kN).

(Exemplo 4)

A engrenagem de dentes retos da **figura 4.13** (diâmetro do passo D_p 150mm, ângulo de pressão $\alpha = 20^\circ$) está apoiada em um par de rolamentos de rolos cônicos, sendo; 4T-32206 ($C_r = 54.5$ kN) e 4T-32205 ($C_r = 42$ kN). Encontre os valores referentes a vida nominal de cada rolamento quando a engrenagem transfere a força $H = 150$ kW a 2,000 rpm.

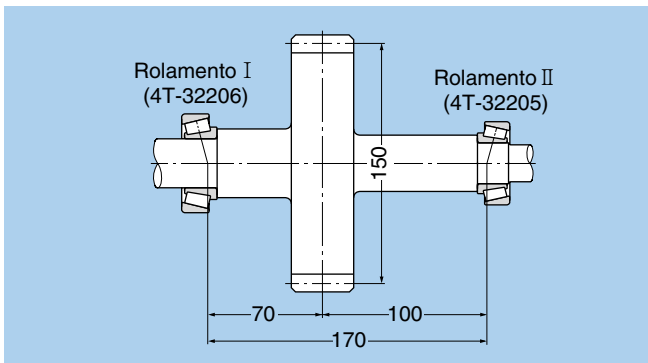


Fig. 4.13 Diagrama da engrenagem de dentes retos

As cargas de engrenamento das fórmulas (4.2), (4.3) e (4.4), são:

$$K_t = \frac{19.1 \times 10^6 \cdot H}{D_p \cdot n} = \frac{19,100 \times 150}{150 \times 2,000}$$

$$= 9.55 \text{ kN} \{974 \text{ kgf}\}$$

$$K_s = K_t \cdot \tan \alpha = 9.55 \times \tan 20^\circ$$

$$= 3.48 \text{ kN} \{355 \text{ kgf}\}$$

$$K_r = \sqrt{K_t^2 + K_s^2} = \sqrt{9.55^2 + 3.48^2}$$

$$= 10.16 \text{ kN} \{1,040 \text{ kgf}\}$$

As cargas radiais aplicadas aos rolamentos I e II, são:

$$F_{rI} = \frac{100}{170} K_r = \frac{100}{170} \times 10.16 = 5.98 \text{ kN}$$

$$F_{rII} = \frac{70}{170} K_r = \frac{70}{170} \times 10.16 = 4.18 \text{ kN}$$

$$\frac{0.5F_{rI}}{Y_I} = 1.87 > \frac{0.5F_{rII}}{Y_{II}} = 1.25$$

A carga radial equivalente da tabela (4.5):

$$P_{rI} = F_{rI} = 5.98 \text{ kN} \{610 \text{ kgf}\}$$

$$P_{rII} = X F_{rII} + Y_{II} \frac{0.5F_{rI}}{Y_I}$$

$$= 0.4 \times 4.18 + 1.67 \times 1.87$$

$$= 4.79 \text{ kN} \{489 \text{ kgf}\}$$

Da fórmula (3.5) e **figura 3.1**, o fator de vida f_h para cada rolamento é:

$$f_{hI} = f_h \frac{C_{rI}}{P_{rI}} = 0.293 \times 54.5 / 5.98 = 2.67$$

$$f_{hII} = f_h \frac{C_{rII}}{P_{rII}} = 0.293 \times 42.0 / 4.79 = 2.57$$

Portanto, $a_2 = 1.4$ (4T-rolamento de rolos cônicos da pág. B-144)

$$L_{hI} = 13,200 \times a_2$$

$$= 13,200 \times 1.4$$

$$= 18,480 \text{ horas}$$

$$L_{hII} = 11,600 \times a_2$$

$$= 11,600 \times 1.4$$

$$= 16,240 \text{ horas}$$

A vida combinada do rolamento L_h , da fórmula 3.3, é:

$$L_h = \frac{1}{\left[\frac{1}{L_{hI}^e} + \frac{1}{L_{hII}^e} \right]^{1/e}}$$

$$= \frac{1}{\left[\frac{1}{18,480^{9/8}} + \frac{1}{16,240^{9/8}} \right]^{8/9}}$$

$$= 9,330 \text{ horas}$$

(Exemplo 5)

Encontre a carga média para um rolamento de rolos esféricos **23932**

($L_a = 320$ kN) quando se opera sob condições flutuantes indicadas na **tabela 4.6**.

Tabela 4.6

Condição Nr. i	Tempo de operação ϕ_i %	Carga radial F_{ri} kN { kgf }	Carga axial F_{ai} kN { kgf }	Rotações n_i rpm
1	5	10 { 1020 }	2 { 204 }	1200
2	10	12 { 1220 }	4 { 408 }	1000
3	60	20 { 2040 }	6 { 612 }	800
4	15	25 { 2550 }	7 { 714 }	600
5	10	30 { 3060 }	10 { 1020 }	400

A carga radial equivalente, P_r , para cada condição de operação é encontrada mediante o uso da equação (4.17) e mostrada na **tabela 4.7**.

Como todos os valores de F_{ri} e F_{ai} das tabelas de rolamentos são maiores que $F_a / F_r > e = 0.18$, $X = 0.67$, $Y_2 = 5.50$.

$$P_{ri} = XF_{ri} + Y_2 F_{ai} = 0.67F_{ri} + 5.50F_{ai}$$

Da equação (4.12) a carga média, F_m , é:

$$F_m = \left[\frac{\sum (P_{ri}^{10/3} \cdot n_i \cdot \phi_i)}{\sum (n_i \cdot \phi_i)} \right]^{3/10} = 48.1 \text{ kN } \{ 4,906 \text{ kgf} \}$$

Tabela 4.7

Condição Nr. i	Carga radial equivalente P_{ri} kN { kgf }
1	17.7 { 1805 }
2	30.0 { 3060 }
3	46.4 { 4733 }
4	55.3 { 5641 }
5	75.1 { 7660 }

(Exemplo 6)

Encontre a vida nominal e a carga axial permissível do rolamento de rolos cilíndricos NUP312 quando operando conforme condições a seguir.

Carga axial intermitente e lubrificação com óleo.

$$\text{Carga radial } F_r = 10 \text{ kN } \{ 1,020 \text{ kgf} \}$$

$$\text{Rotação } n = 2,000 \text{ rpm}$$

A carga radial equivalente é:

$$P_r = F_r = 10 \text{ kN}$$

O fator de rotação de rolamentos de rolos cilíndricos, f_n , para $n = 2,000$ rpm, da **tabela. 3.1**

$$f_n = \left[\frac{33.3}{2,000} \right]^{3/10} = 0.293$$

O fator de vida, f_h , da **tabela. 3.1**

$$f_h = 0.293 \times \frac{124}{10} = 3.63$$

Portanto a vida nominal, L_{10h} , da equação (3.3)

$$L_{10h} = 500 \times 3.63^{10/3} \doteq 37,000$$

A carga axial permissível para rolamentos de rolos cilíndricos é mostrada na página B-93.

Na equação (1) na página B-93, baseado no rolamento NUP312 da tabela 4 na página B-93,

$$k = 0.065.$$

$$d_p = (60 + 130) / 2 = 95 \text{ mm}, n = 2,000 \text{ rpm}$$

Levando em consideração a carga axial intermitente:

$$d_p \cdot n \times 10^4 = 19 \times 10^4$$

Na **fig. 1** na página B-93, $d_p \cdot n = 19 \times 10^4$. A pressão permissível sobre a face do colar é

$$P_t = 40 \text{ MPa}.$$

Portanto a carga axial permissível, P_t , é

$$P_z = 0.065 \times 60^2 \times 40 = 9,360 \text{ N}$$

Baseado na tabela 4 da página B-93, está dentro do limite $F_{a \max} < 0.4 \times 10,000 = 4,000 \text{ N}$. Portanto $P_t < 4,000 \text{ N}$.