

ELEMENTOS DE MÁQUINAS (SEM 0241)

Notas de Aulas v.2018

Aula 12 – Dimensionamento de mancais de rolamentos

Professores: Ernesto Massaroppi Junior
Jonas de Carvalho
Carlos Alberto Fortulan

12 – Dimensionamento (seleção) de Rolamentos

O dimensionamento de rolamentos pode ser feita à partir da carga estática ou da vida requerida.

Iniciando pela capacidade de carga estática se dimensiona um rolamento se baseando em valores das capacidades de carga estática C_0 e dinâmica C . Estes valores são apresentados nas tabelas de rolamento, individualmente.

Cargas nos rolamentos (F_r , F_a)

Cargas teóricas \times Cargas reais de serviço

Incertezas :

- valor real da carga (choque por exemplo)
- direção da carga
- montagem (folga / apertos excessivos)
- lubrificação, temperatura
- desbalanceamento, vibrações

$$F_{calc} = f \cdot F_{teóricas}$$

$f = 1.0 \sim 3.0$ dependendo das incertezas acima

* ISO 281/I-1987

12.1 – Carga Estática num Rolamento

Usa-se capacidade de carga C_0 para dimensionar um rolamento quando:

- Rotações muito baixas; movimentos lentos de oscilação; estacionário sob carga durante certos períodos.
- Em rotação contínua normal quando atuam elevadas cargas de choque de curta duração.
- Para pré seleção dos rolamentos

Capacidade de carga estática C_0

É a carga [N] que produz deformação permanente e total no elemento rolante e na pista, igual a $0.0001 \cdot d_{\text{elem}}$

$$C_0 \geq s_0 P_0$$

C_0 é dado em catálogo.

Para dimensionar :

$$P_0 = X_0 F_r + Y_0 F_a \quad [\text{N}]$$

P_0 : carga estática equivalente [N]

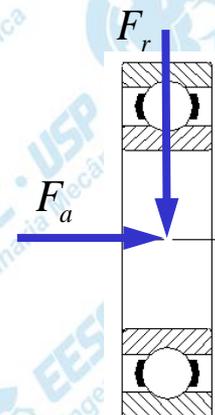
X_0, Y_0 : coeficientes (radial, axial) retirados do catálogo para cada tipo de rolamento

$P_0 = F_r$: para rolamentos que não suportam F_a

$P_0 = F_a$: para rolamentos axiais

s_0 : fator de segurança estática

Se P_0 calculado resultar $< F_r$ então usar $P_0 = F_r$



* ISO 281/I-1987

Valores de referência para o valor de segurança s_0

Tipo de operação	Rolamento em rotação						Rolamentos que não giram	
	Exigência de giro silencioso							
	sem importância		normal		alta			
	Rolamento de esferas	Rolamento de rolos	Rolamento de esferas	Rolamento de rolos	Rolamento de esferas	Rolamento de rolos	Rolamento de esferas	Rolamento de rolos
Suave, sem vibração	0.5	1	1	1.5	2	3	0.4	0.8
Normal	0.5	1	1	1.5	2	3.5	0.5	1
Cargas de choque pronunciadas ¹	≥ 1.5	≥ 2.5	≥ 1.5	≥ 3	≥ 2	≥ 4	≥ 1	≥ 2

Tabela 9, p.53, Catálogo Geral SKF.

- Para rolamentos axiais autocompensadores de rolos aconselha-se o uso de $s_0 \geq 4$
- ¹ Quando a magnitude da carga é desconhecida, devem ser usados pelo menos valores de s_0 tão grandes quanto os da tabela acima. Se a magnitude das cargas de choque são conhecidas exatamente, pode-se adotar valores menores de s_0 .

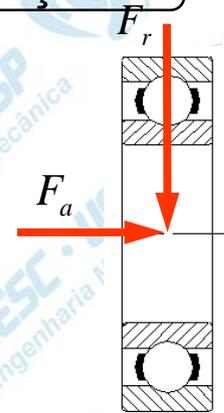
12.2 – Cargas Dinâmicas num Rolamento

Num rolamento em rotação contínua usa-se capacidade de carga dinâmica C no dimensionamento.

“C é a carga nominal que implica numa vida de 1.000.000* de rotações”

Carga dinâmica equivalente :

$$P = X \cdot F_r + Y \cdot F_a \quad [\text{N}]$$



- P : carga dinâmica equivalente [N];
- X, Y : Fatores de carga (radial, axial) coeficientes retirados do catálogo para cada tipo de rolamento;
- F_r : Carga radial real, [N];
- F_a : Carga axial real, [N];
- $P = F_r$: para rolamentos que não suportam F_a ;
- $P = F_a$: para rolamentos axiais.

Se P calculado resultar $< F_r$ então usar $P = F_r$

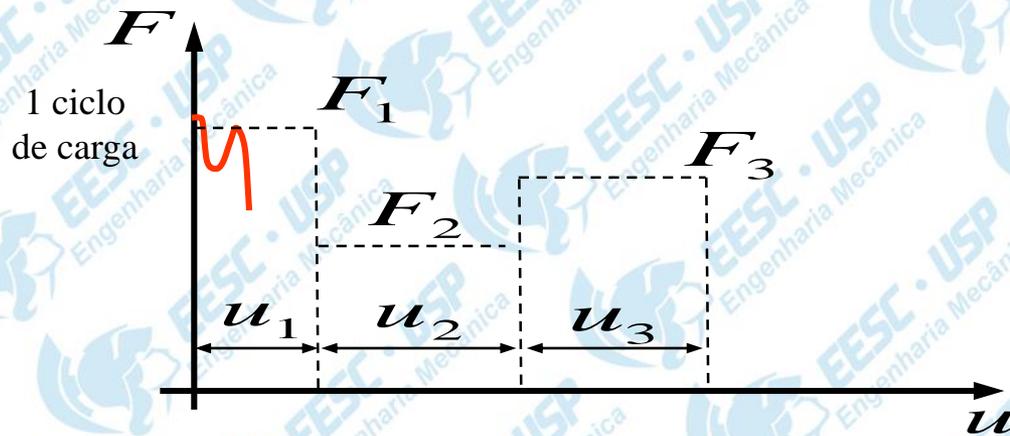
Nos rolamentos radiais de uma carreira, F_a só é levada em com se :

$$\frac{F_a}{F_r} \geq e \quad e : \text{catálogo (p.185 – Catálogo Geral SKF)}$$

* ISO 281/I-1987

Cargas variáveis :

F_a, F_r variáveis \rightarrow usa-se F_{medio}



$$F_{\text{med}} = \sqrt[3]{\frac{\sum F_i^3 u_i}{\sum u_i}}$$

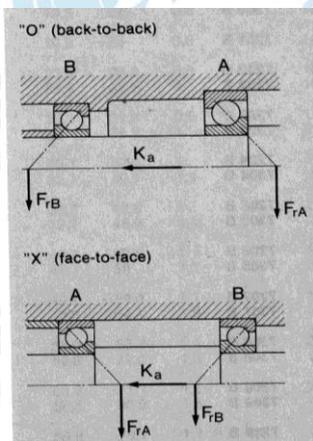
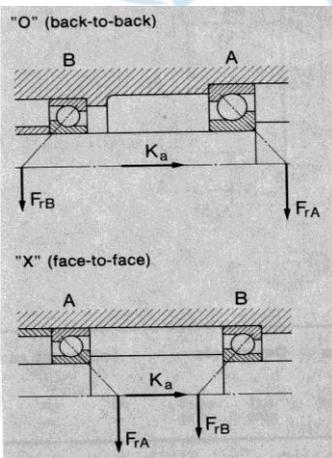
u_i : número de rotações

Se as cargas variam linearmente entre F_{min} e F_{max} :

$$F_{\text{med}} = \frac{F_{\text{min}} + 2F_{\text{max}}}{3}$$

Geralmente as equações de equilíbrio do eixo nos dão F_a , F_r . Mas nos mancais com montagens especiais : Rol. de esferas de contato angular – montagens “O” e “X”

• Rol. de rolos cônicos – montagens “O” e “X”, a situação é hiperestática para a força axial e esta precisa ser determinada em cada mancal como a seguir :



$$F_{rA} \geq F_{rB}$$

$$K_a \geq 0$$

$$F_{aA} = 1.14 \cdot F_{rA}$$

$$F_{aB} = F_{aA} + K_a$$

$$F_{rA} < F_{rB}$$

$$K_a \geq 1.14(F_{rB} - F_{rA})$$

$$F_{aA} = 1.14 \cdot F_{rA}$$

$$F_{aB} = F_{aA} + K_a$$

$$F_{rA} < F_{rB}$$

$$K_a < 1.14(F_{rB} - F_{rA})$$

$$F_{aA} = F_{aB} - K_a$$

$$F_{aB} = 1.14 \cdot F_{rB}$$

$$F_{rA} \leq F_{rB}$$

$$K_a \geq 0$$

$$F_{aA} = F_{aB} + K_a$$

$$F_{aB} = 1.14 \cdot F_{rB}$$

$$F_{rA} > F_{rB}$$

$$K_a \geq 1.14(F_{rA} - F_{rB})$$

$$F_{aA} = F_{aB} + K_a$$

$$F_{aB} = 1.14 \cdot F_{rB}$$

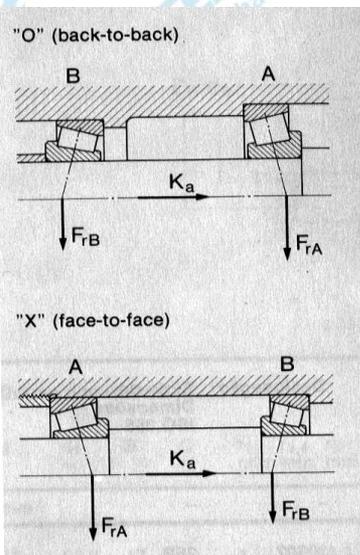
$$F_{rA} > F_{rB}$$

$$K_a < 1.14(F_{rA} - F_{rB})$$

$$F_{aA} = 1.14 \cdot F_{rA}$$

$$F_{aB} = F_{aA} - K_a$$

K_a = Força externa no eixo ou camisa (pré carga) [p.495-496, Catálogo Digital SKF](#)



$$\frac{F_{rA}}{Y_A} \geq \frac{F_{rB}}{Y_B}$$

$$K_a \geq 0$$

$$F_{aA} = \frac{0.5 \cdot F_{rA}}{Y_A}$$

$$F_{aB} = F_{aA} + K_a$$

$$\frac{F_{rA}}{Y_A} < \frac{F_{rB}}{Y_B}$$

$$K_a \geq 0.5 \left(\frac{F_{rB}}{Y_B} - \frac{F_{rA}}{Y_A} \right)$$

$$F_{aA} = \frac{0.5 \cdot F_{rA}}{Y_A}$$

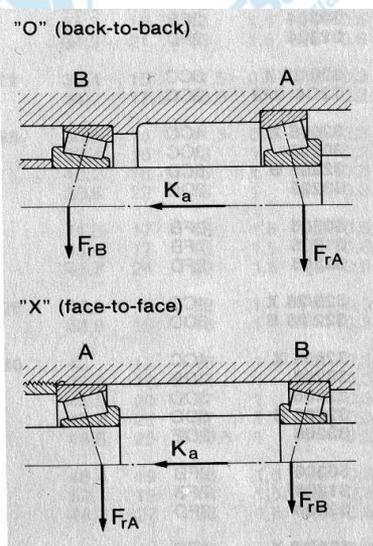
$$F_{aB} = F_{aA} + K_a$$

$$\frac{F_{rA}}{Y_A} < \frac{F_{rB}}{Y_B}$$

$$K_a < 0.5 \left(\frac{F_{rB}}{Y_B} - \frac{F_{rA}}{Y_A} \right)$$

$$F_{aA} = F_{aB} - K_a$$

$$F_{aB} = \frac{0.5 \cdot F_{rB}}{Y_B}$$



$$\frac{F_{rA}}{Y_A} \leq \frac{F_{rB}}{Y_B}$$

$$K_a \geq 0$$

$$F_{aA} = F_{aB} + K_a$$

$$F_{aB} = \frac{0.5 \cdot F_{rB}}{Y_B}$$

$$\frac{F_{rA}}{Y_A} > \frac{F_{rB}}{Y_B}$$

$$K_a \geq 0.5 \left(\frac{F_{rA}}{Y_A} - \frac{F_{rB}}{Y_B} \right)$$

$$F_{aA} = F_{aB} + K_a$$

$$F_{aB} = \frac{0.5 \cdot F_{rB}}{Y_B}$$

$$\frac{F_{rA}}{Y_A} > \frac{F_{rB}}{Y_B}$$

$$K_a < 0.5 \left(\frac{F_{rA}}{Y_A} - \frac{F_{rB}}{Y_B} \right)$$

$$F_{aA} = \frac{0.5 \cdot F_{rA}}{Y_A}$$

$$F_{aB} = F_{aA} - K_a$$

K_a = Força externa no eixo ou camisa (pré carga)

Para os rolamentos de contato angular com montagens especiais, a carga dinâmica equivalente é:

- Na disposição em “Tandem” :

$$P = F_r$$

para

$$\left(\frac{F_a}{F_r} \right) \leq 1.14$$

$$P = 0.35 \cdot F_r + 0.57 \cdot F_a$$

para

$$\left(\frac{F_a}{F_r} \right) > 1.14$$

- Na disposição em “X” ou em “O”:

$$P = F_r + 0.55 \cdot F_a$$

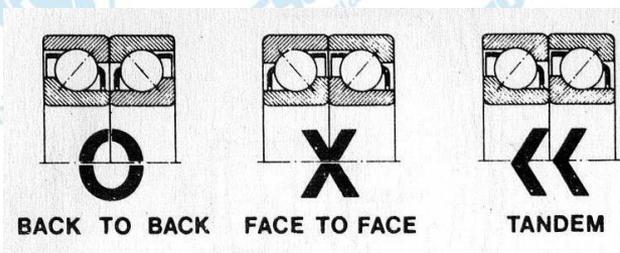
para

$$\left(\frac{F_a}{F_r} \right) \leq 1.14$$

$$P = 0.57 \cdot F_r + 0.93 \cdot F_a$$

para

$$\left(\frac{F_a}{F_r} \right) > 1.14$$

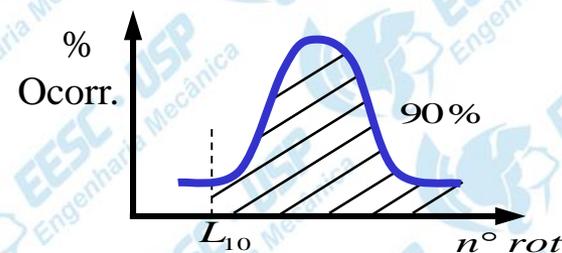


12.3 – Vida de Rolamentos

“É o número de rotações antes que se manifeste o primeiro sinal de fadiga $\longrightarrow L$ (descascamento) nas pistas e/ou elementos rolantes.”

Vida L depende de :

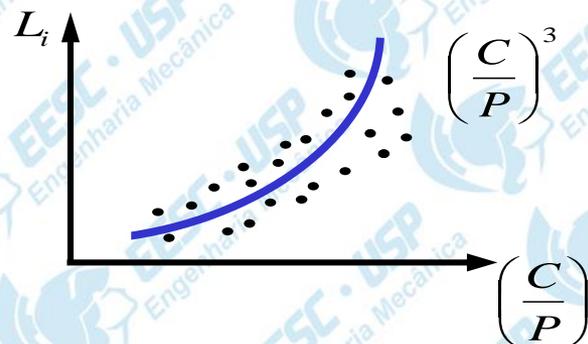
- material do rolamento.
- valor da carga.
- vibrações/choques.
- lubrificação.
- temperatura.
- montagem (folgas, interferência, etc.)



L é determinada estaticamente através de ensaios, tal que 90% dos rolamentos idênticos tenham vida $L_i > L$.

Equação básica :

$$L = \left(\frac{C}{P} \right)^p$$



L - vida nominal em milhões de rotações

C - Capacidade de carga dinâmica do rolamento, dada em catálogo [N]

P - Carga dinâmica equivalente aplicada [N]

$p = \begin{cases} 3 & \text{- elementos rolantes esféricos} \\ 10/3 & \text{- elementos rolantes de rolos} \end{cases}$

Vida em horas de serviço : L_h

$$L_h = \frac{10^6}{60 \cdot n} \cdot \left(\frac{C}{P} \right)^p \quad [\text{horas}]$$

n : [rpm]

Fórmula ampliada da vida de rolamentos (nominal ajustada)

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

ou

$$L_h = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot \frac{10^6}{60 \cdot n} \cdot \left(\frac{C}{P} \right)^p$$

a_1 : fator de ajuste da confiabilidade

%	a_1
90	1.00
95	0.62
96	0.53
97	0.44
98	0.33
99	0.21

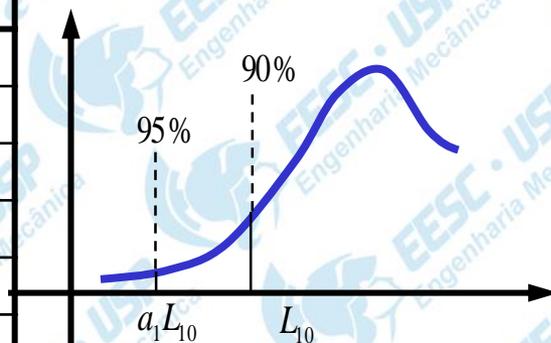


Tabela 6 Valores de a_1 , p.35, Catálogo Geral SKF.

a_2 : fator de ajuste para material do rolamento

T [°C]	a_2
150	1.00
200	0.73
250	0.42
300	0.22

Para bons (??) fabricantes e $t < 150^\circ\text{C}$ $\rightarrow a_2 = 1.0$

a_2 ajusta a diminuição das propriedades mecânicas do material com a temperatura

Guia para valores de vida nominal requerido L_{10h} em diferentes classes de máquinas

Classe de máquina	Horas de trabalho
Eletrdomésticos, máquinas agrícolas, instrumentos, aparelhos técnicos para uso médico.	300 a 3.000
Máquinas utilizadas em curtos períodos ou intermitentemente: máquinas ferramentas manuais, dispositivos de elevação em oficinas, máquinas para construções	3.000 a 8.000
Máquinas para trabalhar com alta confiabilidade durante períodos curtos ou intermitentemente: Elevadores, guindastes para produtos embalados, ou amarras de tambores, fardos, etc.	8.000 a 12.000
Máquinas para 8 horas de trabalho, não totalmente utilizados: transmissões de engrenagens para uso geral, motores elétricos para uso industrial, trituradores rotativos, etc.	10.000 a 25.000
Máquinas para 8 horas de trabalho diário, totalmente utilizados: máquinas ferramentas, máquinas para trabalhar madeira, máquinas para indústria mecânica em geral, gruas para materiais a granel, ventiladores, correias transportadoras, máquinas de impressão, separadores e centrífugas.	20.000 a 30.000
Máquinas para trabalho contínuo, 24 horas por dia: caixas de pinhões para laminadores, maquinário elétrico de porte médio, compressores, elevadores de minas, bombas, máquinas têxteis.	40.000 a 50.000
Equipamentos de abastecimento de água, fornos rotativos, torcedeiras de cabos, máquinas propulsoras de navios.	60.000 a 100.000
Máquinas para fabricação de celulose e papel, máquinas elétricas de grande porte, centrais de energia, bombas e ventiladores para minas, mancais de eixos propulsores de navios.	~ 100.000

Se a vida calculada for insuficiente :

- Melhorar lubrificação
- Mudar para séries mais pesadas (maior C) do mesmo tipo de rolamento. Ex

Tabela 4, p.34, Catálogo Geral SKF.
Tabela 9, p.83, Catálogo Digital SKF.

- Mudar de tipo (esfera → rolo)
- Mudar tamanho ($\uparrow d$)

d	D	C	N°
20	32	2650	61804
20	72	30700	6404

a_3 : fator de ajuste para lubrificação A SKF combina os fatores a_2 e a_3 :

$$a_{23} = a_2 \cdot a_3$$

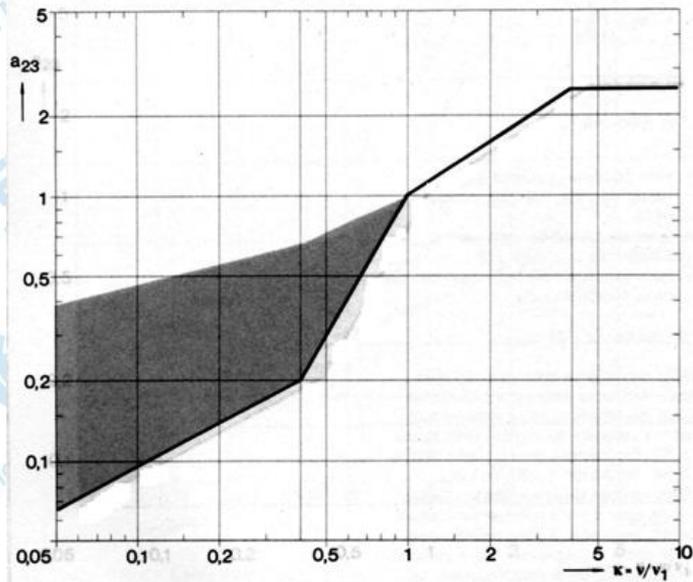
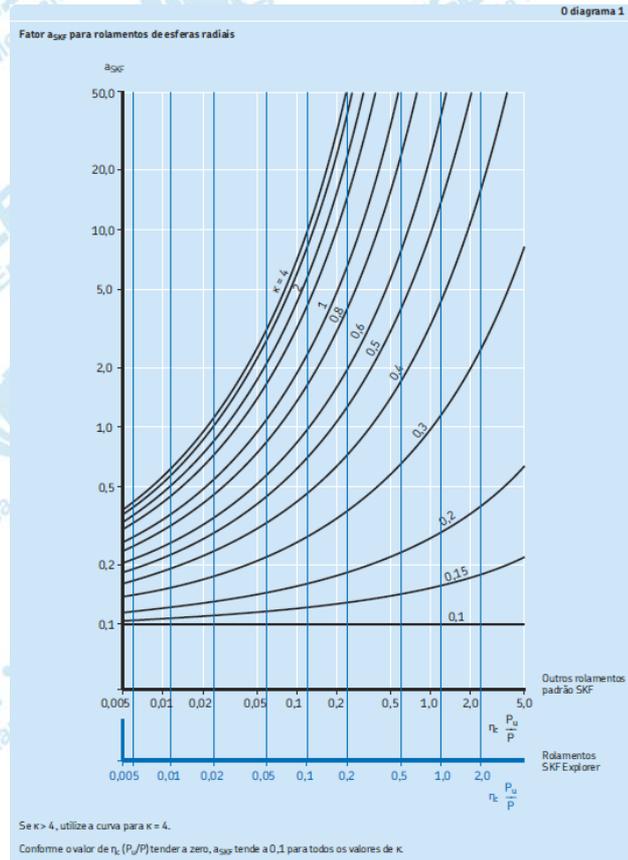


Diagrama 3, p.39, Catálogo Geral SKF.

$$k = \frac{\nu}{\nu_1} \quad \text{Relação de viscosidade}$$



Diagramas 1, p.66-69, Catálogo Digital SKF.

ν_1 : Viscosidade cinemática [mm²/s] requerida na temperatura de serviço

ν : Viscosidade do óleo utilizado na temperatura de serviço

Para graxa: usar viscosidade do óleo base.

Cálculo inverso

O método de cálculo apresentado é iterativo (adota-se rolamento e verifica-se se suporta). Isto pode demandar muitas iterações, neste caso usar o cálculo inverso partindo-se da vida desejada da tabela da página anterior

$$\frac{L_{calc\ nec}}{60 \cdot n} \geq L_{desejada} \quad \Rightarrow \quad L_{calc\ nec} \geq L_{desejada} \cdot 60 \cdot n$$

$$a_1 \cdot a_{23} \cdot \left(\frac{C}{P} \right)^P \geq L_{desejada} \cdot 60 \cdot n$$

$$C_{nec} \geq P \cdot \left(\frac{L_{desejada} \cdot 60 \cdot n}{a_1 \cdot a_{23} \cdot 10^6} \right)^{1/P}; \quad \begin{matrix} L_{desejada} \text{ em horas} \\ n \text{ (rpm)} \end{matrix}$$

De posse de C_{nec} procura-se no catálogo o rolamento que satisfaça.

12.4 – Limites de Rotação

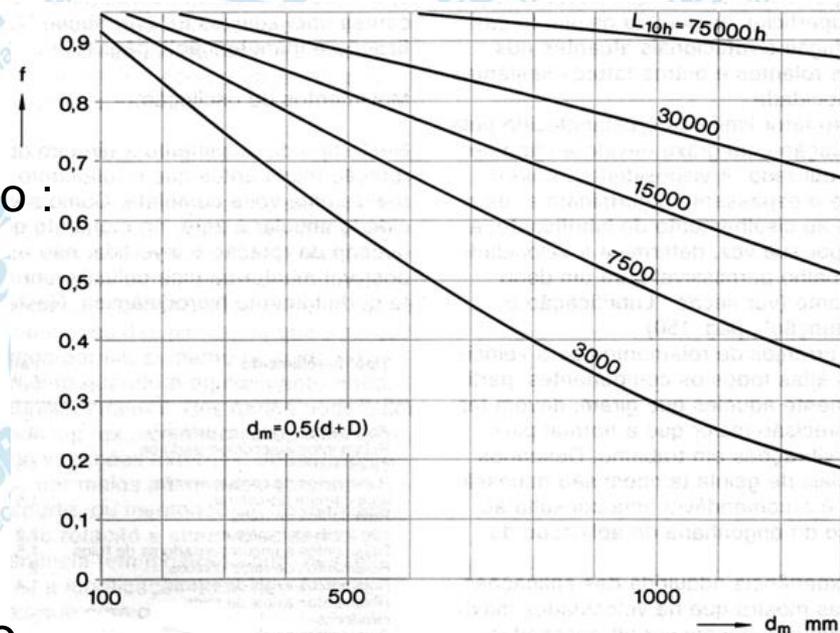
Catálogos indicam n_{\max} de cada rolamento quando :

- Carga pequena ($L_h > 150.000$)
- lubrificação / refrigeração “normal”
- n_{\max} até 40.000 rpm

n_{\max} depende :

- tipo de rolamento
- tamanho
- carga
- lubrificação
- folga
- gaiola

p.65, Catálogo Geral SKF.



Para rolamentos grandes e $L_h \leq 75000$ h :

$$n_{\max} = f \cdot n_{\max \text{ catálogo}}$$

É possível aumentar de 40 a 200% $n_{\max \text{ cat}}$ otimizando os parâmetros de influência :

- de esfera
- pequeno
- carga bem baixa
- lubrificação forçada ou spray
- folga maior
- gaiola especial

Catálogo Digital

Lubrificação a óleo

$$n_{ar} = n_r f_p f_v$$

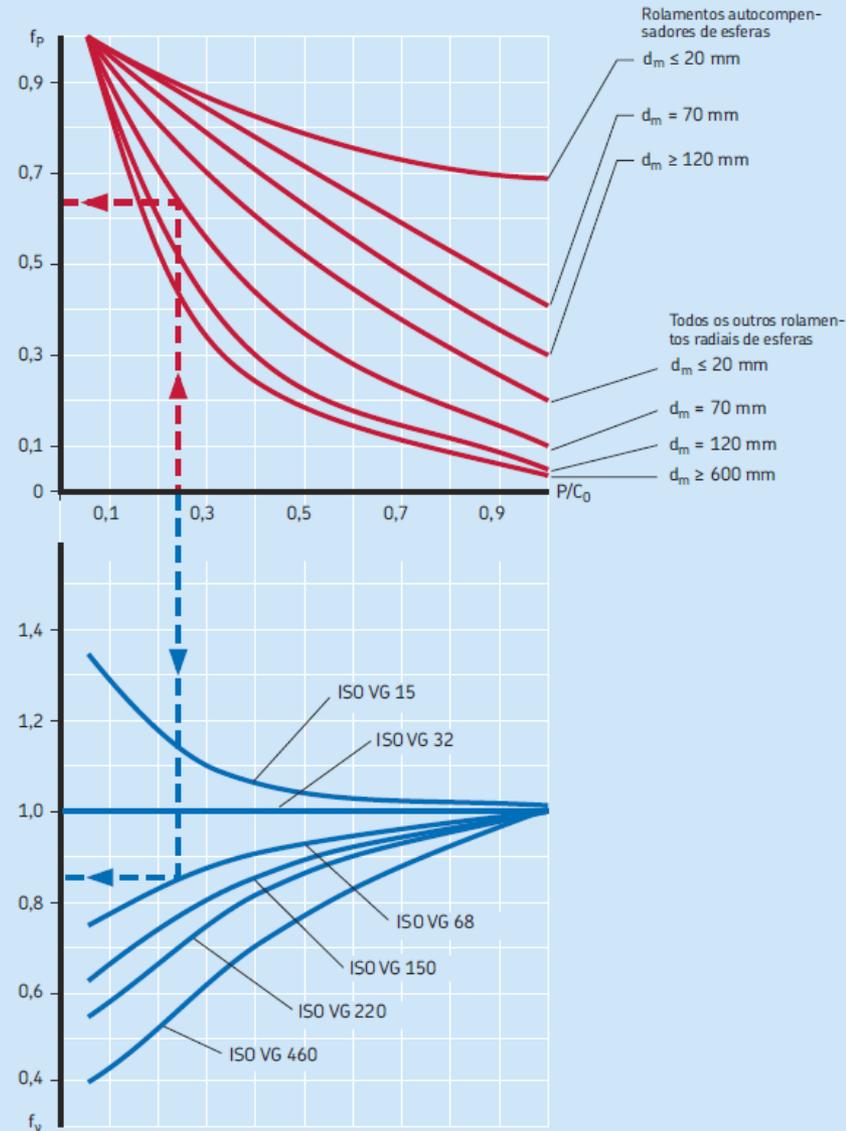
Velocidade de referência (rpm) - catálogo

Lubrificação a graxa

$$n_{ar} = n_r f_p \frac{f_v \text{ viscosidade real do óleo base}}{f_v \text{ ISO VG150}}$$

Diagramas2, p.125-1258, Catálogo Digital SKF.

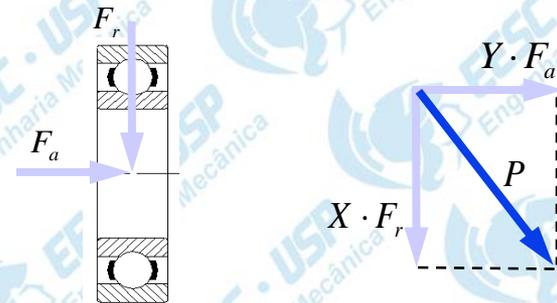
Fatores de ajuste f_p e f_v para rolamentos radiais de esferas



12.5 – Momento de Atrito

$$M_a = \mu \cdot P \cdot \frac{d}{2} \quad [\text{N} \cdot \text{mm}]$$

Ver Tabela 1, p.98, Catálogo Digital SKF.



A fórmula acima é aproximada e vale quando : $P \cong 0.1C$, boa lubrificação, condições normais de operação

P, carga aplicada sobre o rolamento, N
d, diâmetro do furo do rolamento, mm

Nos demais casos :

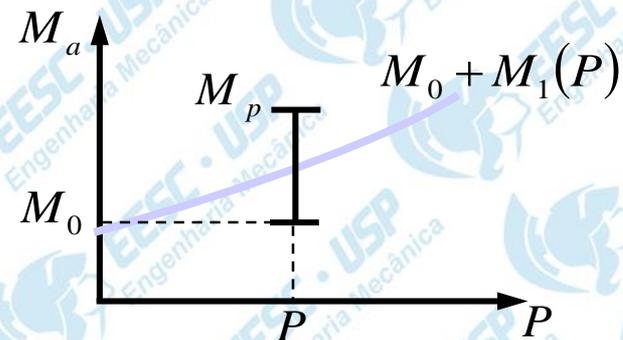
$$M_a = M_0 + M_1(P)$$

$$M_p \cong 2 \cdot M_1(P)$$

e momento de partida

M_0 , momento de atrito independente da carga aplicada

M_1 , momento de atrito dependente da carga aplicada



Catálogo Geral SKF, p.56-57- * Tabela expandida p.57

Tabela 1

Coefficiente constante de atrito μ para rolamentos abertos
(rolamentos sem vedações de contato)

Tipo de rolamento	Coefficiente de atrito μ
Rolamentos rígidos de esferas	0,0015
Rolamentos de esferas de contato angular	
– uma carreira	0,0020
– de duas carreiras	0,0024
– de quatro pontos de contato	0,0024
Rolamentos autocompensadores de esferas	0,0010
Rolamentos de rolos cilíndricos	
– com uma gaiola, quando $F_a \approx 0$	0,0011
– número máximo de rolos, quando $F_a \approx 0$	0,0020
Rolamentos de rolos de agulhas com gaiola	0,0020
Rolamentos de rolos cônicos	0,0018
Rolamentos autocompensadores de rolos	0,0018
Rolamentos de rolos toroidais CARB com gaiola	0,0016
Rolamentos axiais de esferas	0,0013
Rolamentos axiais de rolos cilíndricos	0,0050

Tabela 1, p.98, Catálogo Digital SKF.

Catálogo Geral SKF, Tabela 1 p.57

12.6 – Lubrificação de Rolamentos

Objetivos :

- Evitar contato metálico elemento rolante / pista / gaiola
- Proteger contra corrosão

Lubrificação com graxa

Graxa : óleo mineral base com espessante (Ca, Na, Li)

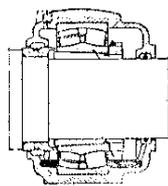
Uso de graxa como lubrificante { $t < 60^{\circ}\text{C}$

- Fácil retenção
- eixos verticais
- ajuda vedação contra impurezas

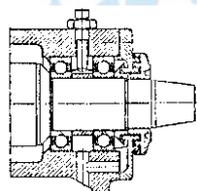
Graxa precisa ser renovada !!!

Lubrificação com óleo

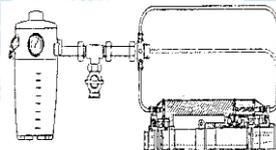
- rotações elevadas
- temperaturas elevadas
- retira calor do mancal
- pode usar óleo da lubrificação do restante da máquina



(a)



(b)



(c)

(a) Banho de óleo

(b) Circulação forçada

(c) Spray

Métodos de lubrificação com óleo

Banho

- Baixas rotações (até 500 rpm – ver relação com limite de rotação do rolamento no catalogo)
- Óleo até metade do elemento rolante
- Acelera oxidações – efeito "batedeira" → trocas mais freqüentes

Circulação forçada

- Sistema central de lubrificação
- Evita trocas freqüentes
- Pode incluir refrigeração no circuito

Spray

- Altíssimas rotações
- Lubrificação + refrigeração

Seleção do Lubrificante

- Escolhe-se pela viscosidade cinemática ν
- No caso de graxa: ν do óleo base

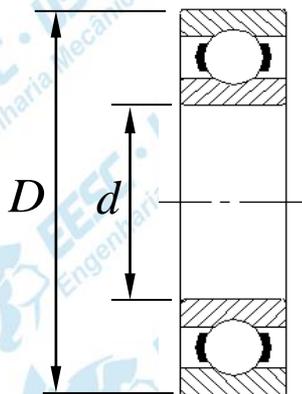
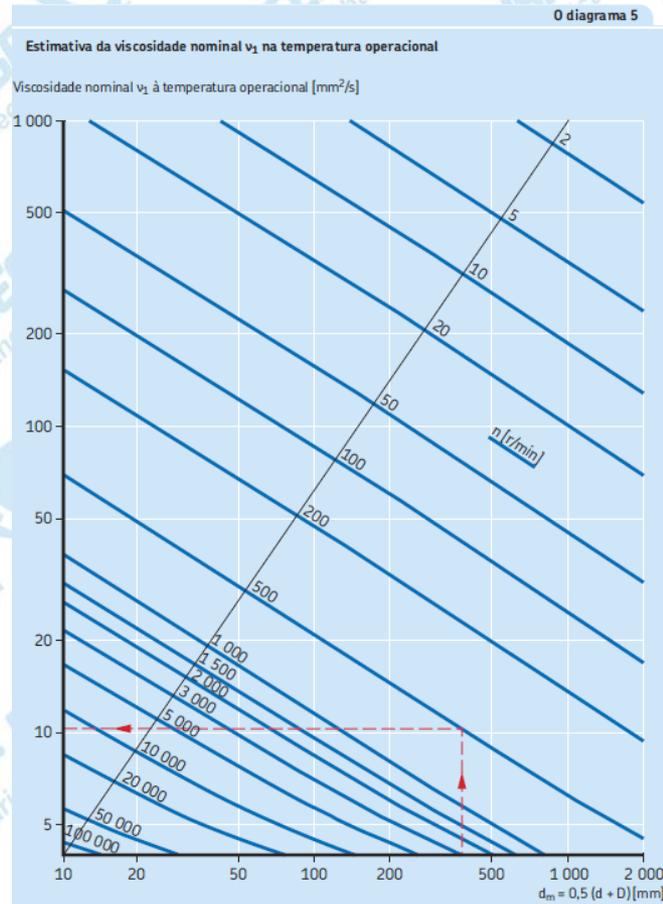


Diagrama 2, p.160, Catálogo Geral SKF.

Diagrama 5, p.72, Catálogo Digital SKF.



• Tendo-se

$$d_m = \frac{d + D}{2}$$

e rotação de serviço



v_1 viscosidade necessária em serviço (portanto na temperatura de serviço)

Por exemplo :

Para $d_m = 350$ [mm] e $n = 500$ [rpm] temos $v_1 = 13$ [mm²/s] à 70°C

As viscosidades são normalmente medidas a 40°C portanto precisa-se corrigir a viscosidade para este valor com o gráfico.

No exemplo dado a viscosidade necessária a 40°C será $v_{nec} = 38$ [mm²/s]. Escolhe-se então o lubrificante, p.ex: ISOVG46 cuja $v_{40°C} = 46$ [mm²/s] a 40°C e $v = 15.5$ a 70°C usando o mesmo ábaco.

Acha-se então :

$$K = \frac{v}{v_1} = \frac{15.5}{13} = 1.19$$

no ex. dado para determinar-se a vida do rolamento

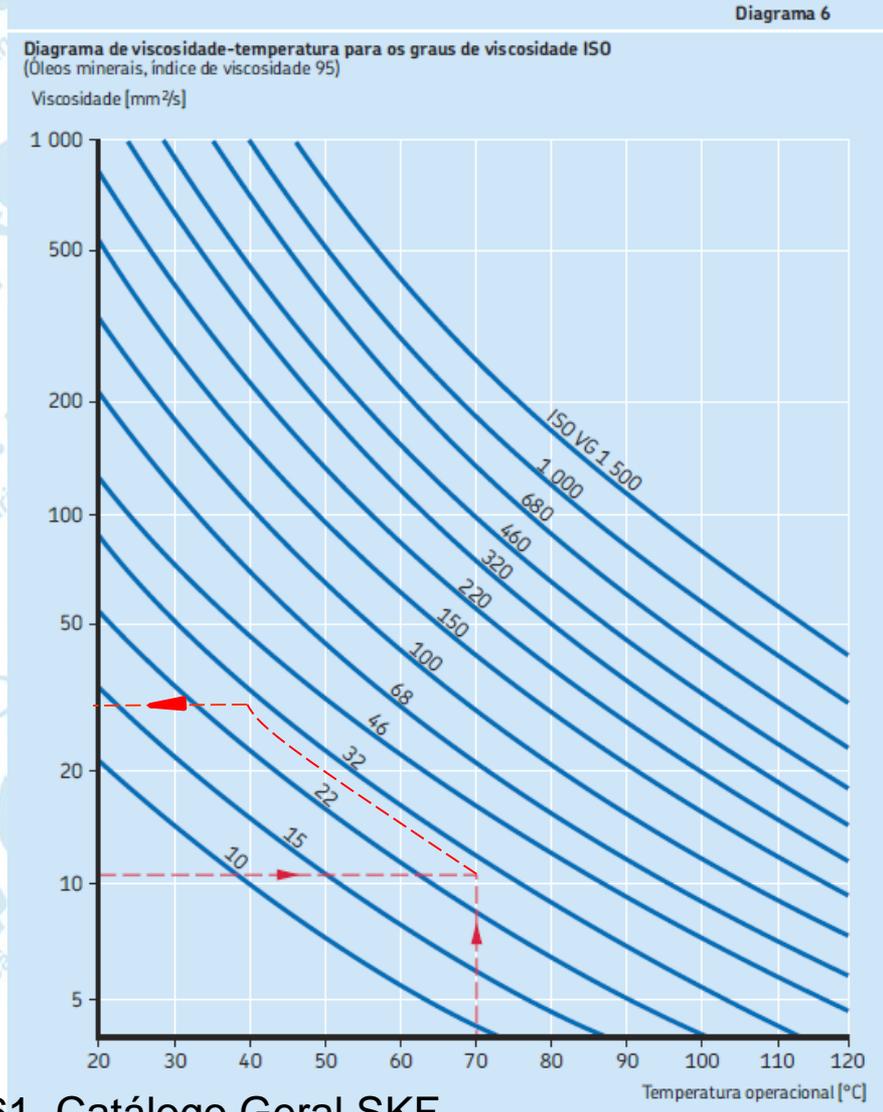


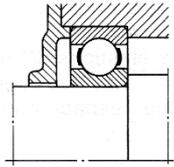
Diagrama 3, p.161, Catálogo Geral SKF.

Diagrama 6, p.73, Catálogo Digital SKF.

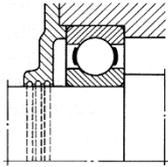
Vedadores

I - Sem contato (“labirintos“)

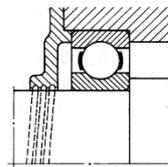
não aumentam o momento de atrito



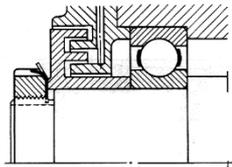
a



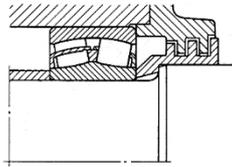
b



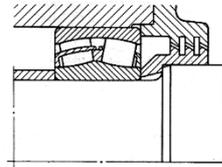
c



d



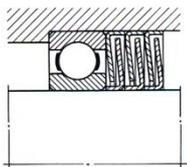
e



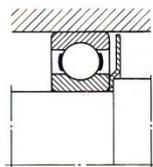
f

- a) Vão liso;
- b) ranhuras concêntricas;
- c) Ranhuras em hélice (esquerda ou direita)

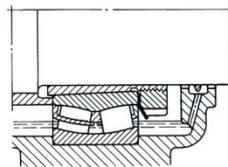
- d) Labirintos axiais;
- e) Labirintos em caixas bipartidas;
- f) Labirintos com vãos inclinados (desalinhamento angular)



a



b



c

- a) Anéis de vedação;
- b) Anéis rotativos montados no eixo;
- c) Anéis defletores - ranhuras ou discos p/ óleo.

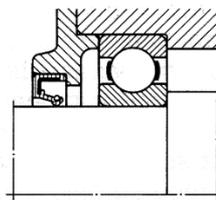
II - Vedadores (com contato)

- Anéis retentores

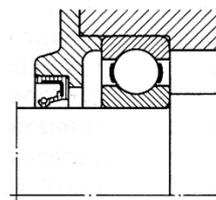
a) evita saída de óleo

b) evita entrada de contaminantes

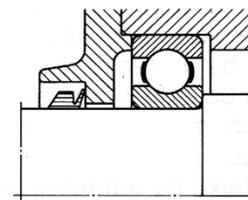
c) em “v” graxa ou óleo (preso no eixo)



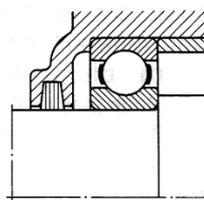
a



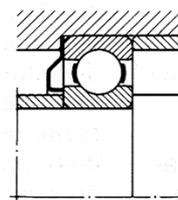
b



c



d



e

- Anéis de feltro

Usados para graxa (d)

- Anéis vedadores elásticos

12.7. Referências

- MANFÉ, G. et al. Manual de desenho técnico mecânico, v3, 1975, p.54
- FAG (appud MANFÉ, G. et al. Manual de desenho técnico mecânico, v3, 1975.)
- SKF - Catálogo Geral, 976p. 1989
- SKF- Aplicações de rolamentos- Publicação nº 2999 (1975).