

9.6 – Dimensionamento de Rolamentos

Inicialmente, dimensiona-se um rolamento com base em valores das capacidades de carga estática, C_0 e da capacidade de carga dinâmica, C . Estes valores são apresentados nas tabelas de rolamentos, individualmente.

9.6.1 – 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

Capacidade de carga estática C_0

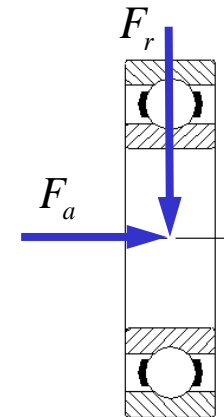
É a carga [N] que produz deformação permanente e total no elemento rolante e na pista, igual a: $0,0001 \cdot d_{\text{elem}}$

C_0 é dado em catálogo.

$$C_0 \geq s_0 P_0$$

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 $P_0 = F_r$

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

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 .

Ex: Rolamento rígido de esferas:

- Individuais ou em dispostos em Tandem: $P_0 = 0,6F_r + 0,5 F_a$
- Dispostos em X ou O: $P_0 = F_r + 1,7F_a$

Ex: Rolamentos autocompensadores de esfera: $P_0 = F_r + Y_0 F_a$ (**ver catálogo SKF**)

9.6.2 – 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

Cargas nos rolamentos (F_r , F_a)

Cargas teóricas x Cargas reais de serviço

Incertezas

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

$$F_{calc} = f \cdot F_{teóricas}$$

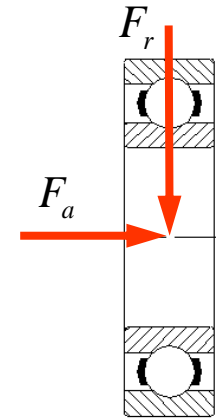
$f = 1.0 \sim 3.0$ dependendo das incertezas acima

* ISO 281/I-1987

Uma vez determinadas a força radial e a força axial nos mancais calcula-se a carga dinâmica equivalente

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 conta se:

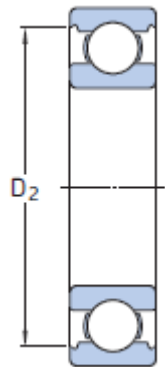
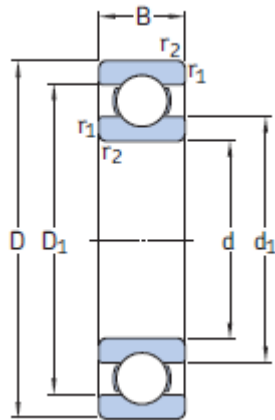
$$\frac{F_a}{F_r} > e$$

e : catálogo (p.315, Tab. 8 – Catálogo SKF)

**Rolamentos de uma e de duas carreiras
Folga normal**

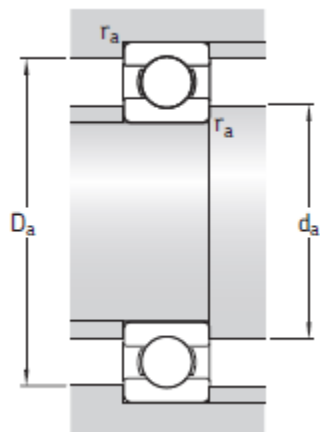
$f_0 F_a/C_0$	e	X	Y
0,172	0,19	0,56	2,3
0,345	0,22	0,56	1,99
0,689	0,26	0,56	1,71
1,03	0,28	0,56	1,55
1,38	0,3	0,56	1,45
2,07	0,34	0,56	1,31
3,45	0,38	0,56	1,15
5,17	0,42	0,56	1,04
6,89	0,44	0,56	1

Notas de aula – Aula 12 – Dimensionamento de mancais de rolamentos



Dimensões principais			Classificações básicas de carga		Limite de carga de fadiga P_u	Classificações de velocidade		Massa	Designação
d	D	B	dinâmica C	estática C_0		Velocidade de referência	Velocidade-limite		
mm			kN		kN	r/min	kg	-	
40	52	7	4,49	3,75	0,16	26 000	16 000	0,032	61808
	62	12	13,8	10	0,425	24 000	14 000	0,12	61908
	68	9	13,8	10,2	0,44	22 000	14 000	0,13	* 16008
	68	15	17,8	11	0,49	22 000	14 000	0,19	* 6008
	80	18	32,5	19	0,8	18 000	11 000	0,37	* 6208
	80	18	35,8	20,8	0,88	18 000	11 000	0,34	6208 ETN9
	90	23	42,3	24	1,02	17 000	11 000	0,63	* 6308
	110	27	63,7	36,5	1,53	14 000	9 000	1,25	6408
45	58	7	6,63	6,1	0,26	22 000	14 000	0,04	61809
	68	12	14	10,8	0,465	20 000	13 000	0,14	61909
	75	10	16,5	10,8	0,52	20 000	12 000	0,17	* 16009
	75	16	22,1	14,6	0,64	20 000	12 000	0,24	* 6009
	85	19	35,1	21,6	0,915	17 000	11 000	0,42	* 6209
	100	25	55,3	31,5	1,34	15 000	9 500	0,84	* 6309
50	120	29	76,1	45	1,9	13 000	8 500	1,55	6409
	65	7	6,76	6,8	0,285	20 000	13 000	0,052	61810
	72	12	14,6	11,8	0,5	19 000	12 000	0,14	61910
	80	10	16,8	11,4	0,56	18 000	11 000	0,18	* 16010
	80	16	22,9	16	0,71	18 000	11 000	0,26	* 6010
	90	20	37,1	23,2	0,98	15 000	10 000	0,45	* 6210
55	110	27	65	38	1,6	13 000	8 500	1,1	* 6310
	130	31	87,1	52	2,2	12 000	7 500	1,95	6410
	72	9	9,04	8,8	0,375	19 000	12 000	0,083	61811
	80	13	16,5	14	0,6	17 000	11 000	0,19	61911
	90	11	20,3	14	0,695	16 000	10 000	0,27	* 16011
	90	18	29,6	21,2	0,9	16 000	10 000	0,39	* 6011

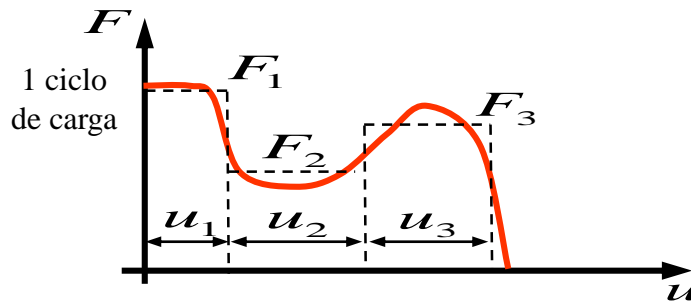
Notas de aula – Aula 12 – Dimensionamento de mancais de rolamentos



Dimensões					Dimensões de encosto e raio			Fatores de cálculo		
d	d ₁	D ₁	D ₂	r _{1,2} min.	d _a min.	D _a máx.	r _a máx.	k _r	f ₀	
mm					mm			-		
40	43,2	48,1	-	0,3	42	50	0,3	0,015	15	
	46,9	55,1	-	0,6	43,2	58,8	0,6	0,02	16	
	49,4	58,6	-	0,3	42	66	0,3	0,02	16	
	49,2	58,8	61,1	1	44,6	63,4	1	0,025	15	
	52,6	67,4	69,8	1,1	47	73	1	0,025	14	
	52	68,8	-	1,1	47	73	1	0,025	13	
	56,1	73,8	77,7	1,5	49	81	1,5	0,03	13	
	62,8	87	-	2	53	97	2	0,035	12	
	45	49,1	53,9	-	0,3	47	56	0,3	0,015	17
		52,4	60,6	-	0,6	48,2	64,8	0,6	0,02	16
55		65	-	0,6	48,2	71,8	0,6	0,02	14	
54,7		65,3	67,8	1	50,8	69,2	1	0,025	15	
57,6		72,4	75,2	1,1	52	78	1	0,025	14	
62,1		82,7	86,7	1,5	54	91	1,5	0,03	13	
68,9		95,9	-	2	58	107	2	0,035	12	
50		55,1	59,9	-	0,3	52	63	0,3	0,015	17
	56,9	65,1	-	0,6	53,2	68,8	0,6	0,02	16	
	60	70	-	0,6	53,2	76,8	0,6	0,02	14	
	59,7	70,3	72,8	1	54,6	75,4	1	0,025	15	
	62,5	77,4	81,7	1,1	57	83	1	0,025	14	
	68,7	91,1	95,2	2	61	99	2	0,03	13	
	75,4	105	-	2,1	64	116	2	0,035	12	
	55	60,6	66,4	-	0,3	57	70	0,3	0,015	17
63,2		71,8	-	1	59,6	75,4	1	0,02	16	
67		78,1	-	0,6	58,2	86,8	0,6	0,02	14	
66,3		78,7	81,5	1,1	61	84	1	0,025	15	

Cargas variáveis :

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



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

u_i : número de rotações

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

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

Catálogo Geral SKF, p. 50-51

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

- Na disposição em “Tandem” :

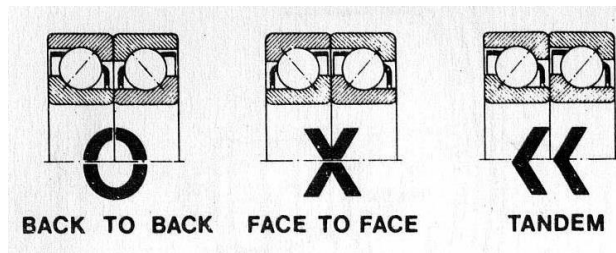
$$P = F_r \quad \text{para} \quad \left(\frac{F_a}{F_r} \right) \leq 1.14$$

$$P = 0.35 \cdot F_r + 0.57 \cdot F_a \quad \text{para} \quad \left(\frac{F_a}{F_r} \right) > 1.14$$

- Na disposição em “X” ou em “O”:

$$P = F_r + 0.55 \cdot F_a \quad \text{para} \quad \left(\frac{F_a}{F_r} \right) \leq 1.14$$

$$P = 0.57 \cdot F_r + 0.93 \cdot F_a \quad \text{para} \quad \left(\frac{F_a}{F_r} \right) > 1.14$$

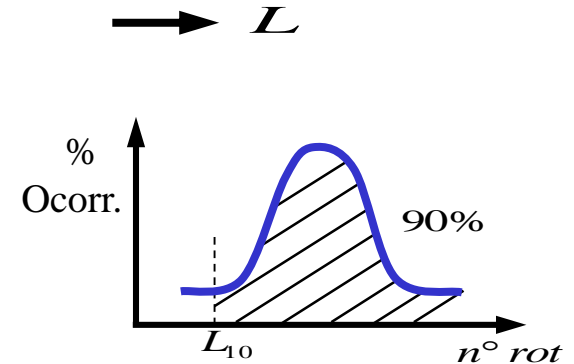


9.7 – Vida de Rolamentos

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

Vida L depende de :

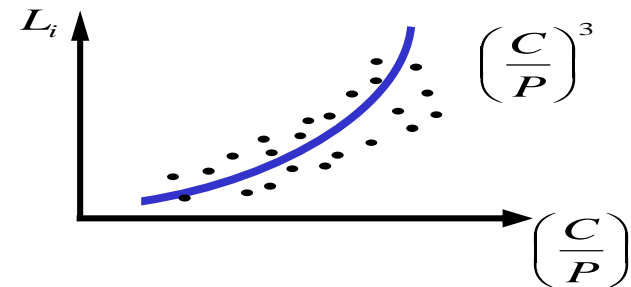
- material do rolamento.
- valor da carga.
- vibrações/choques.
- lubrificação.
- temperatura.
- montagem (folgas, interferência, etc.)



Determina-se estaticamente L através de ensaios e tal que 90% dos rolamentos idênticos ensaiados 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

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

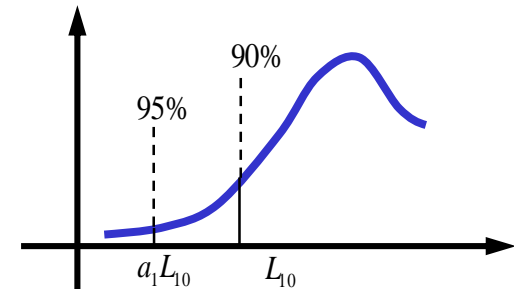
n : [rpm]

Fórmula ampliada da vida de rolamentos (nominal ajustada)

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

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



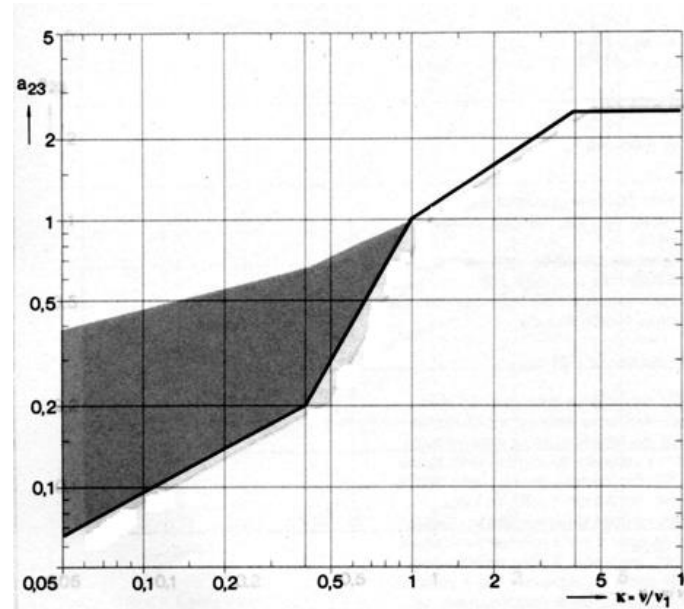
a_2 : fator de ajuste para material do rolamento

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

a_3 : fator de ajuste para lubrificação



A SKF combina os fatores a_2 e a_3 :

Diagrama 3, p.39, Catálogo Geral SKF (antigo).

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

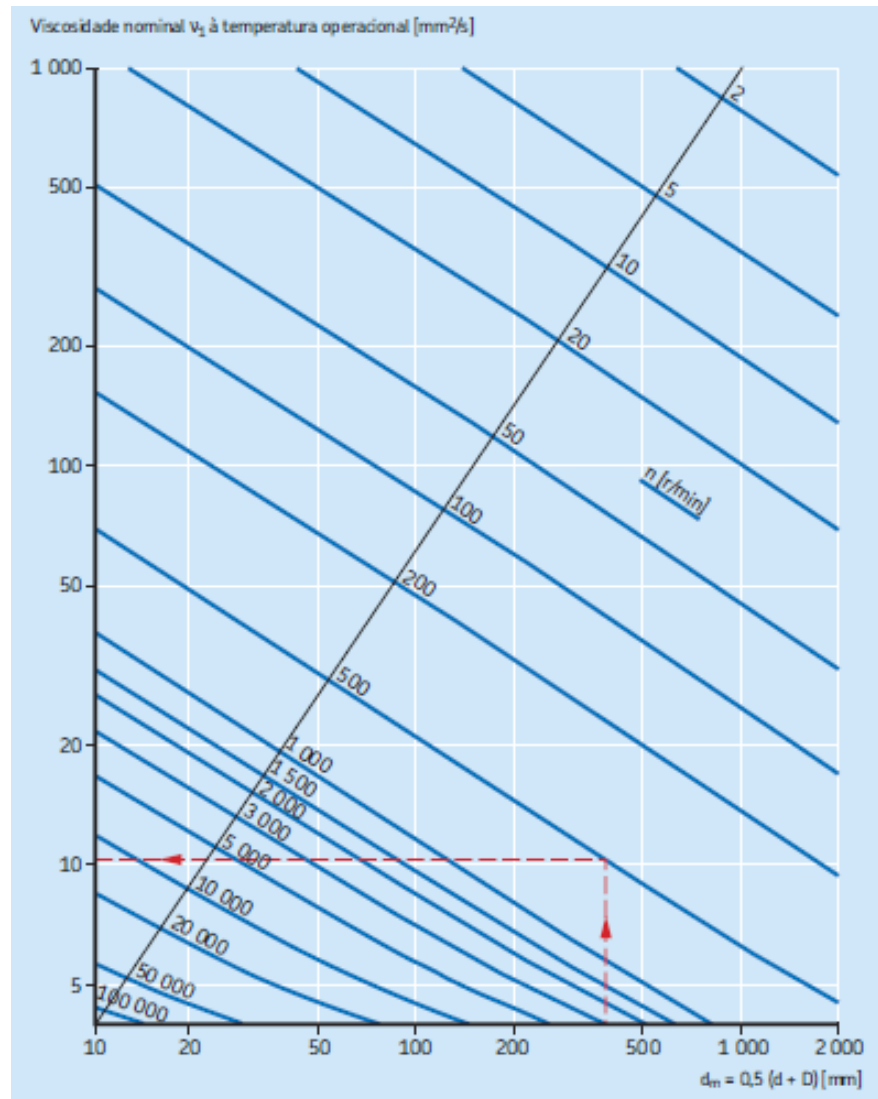
$$k = \frac{\nu}{\nu_1} \quad \text{Relação de viscosidade}$$

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

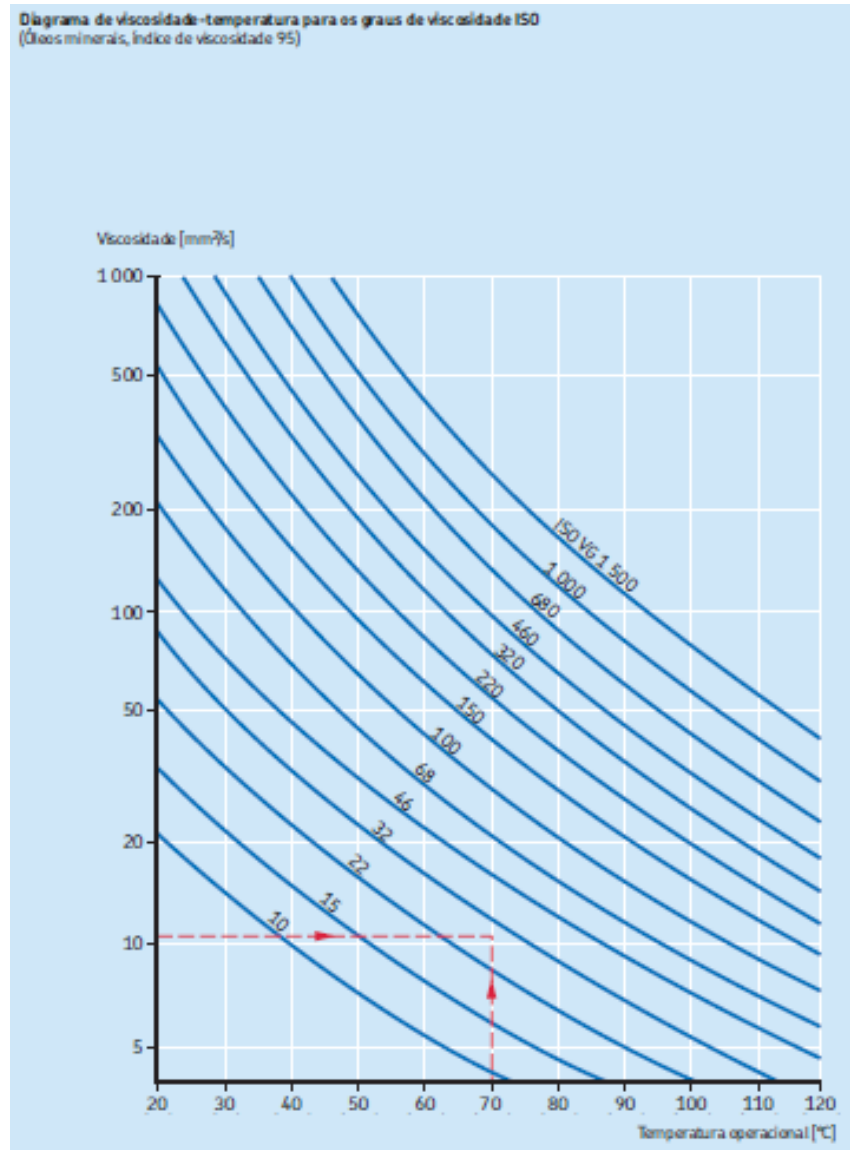
ν : Viscosidade do óleo utilizado na temperatura de serviço

Para graxa usar viscosidade do óleo base.

Catálogo SKF Pág. 268



Catálogo SKF Pág. 269



Notas de aula – Aula 12 – Dimensionamento de mancais de rolamentos

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

Classe de máquina	Horas de trabalho
Eletrodomésticos, máquinas agrícolas, instrumentos, aparelhos técnicos para uso médico	300 a 3000
Máquinas utilizadas em curtos períodos ou intermitentemente: Máquinas ferramentas manuais, dispositivos de elevação em oficinas, máquinas para construções	3000 a 8000
Máquinas para trabalhar com alta confiabilidade durante períodos curtos ou intermitentemente: Elevadores, guindastes para produtos embalados, ou amarras de tambores, fardos, etc.	8000 a 12000
Máquinas para 8 horas de trabalho, não totalmente utilizados: Transmissões de engrenagens para uso geral, motores elétricos para uso industrial, trituradores rotativos, etc.	10000 a 25000
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.	20000 a 30000
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.	40000 a 50000
Equipamentos de abastecimento de água, fornos rotativos, torcedoras de cabos, máquinas propulsoras de navios.	60000 a 100000
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.	~ 100000

Se a vida calculada for insuficiente :

Catálogo Geral SKF.

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

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

- Mudar de tipo (esfera → rolo)
- Mudar tamanho (↑ d)

Classificação do serviço	Vida requerida L_{10h} e aplicação em máquinas $\times 10^3$ h				
	~4	4~12	12~30	30~60	60~
Máquinas usadas por curtos períodos de tempo ou usadas ocasionalmente	<ul style="list-style-type: none"> ● Ferramentas manuais elétricas ● Eletrodomésticos 	<ul style="list-style-type: none"> ● Máquinas agrícolas ● Equipamentos para escritório 			
Período curto ou intermitente, mas com requerimentos de alta confiabilidade.	<ul style="list-style-type: none"> ● Instrumentos de aplicação médica ● Instrumentos de medição 	<ul style="list-style-type: none"> ● Motores para equipamentos de ar-condicionado ● Equipamentos de medição ● Elevadores ● Guindastes 	<ul style="list-style-type: none"> ● Guindastes(talhas) 		
Máquinas de uso não constante, mas usadas por períodos longos	<ul style="list-style-type: none"> ● Automóveis ● Veículos de 2 rodas 	<ul style="list-style-type: none"> ● Motores pequenos ● Ônibus/caminhões ● Impulsores ● Máquinas para carpintaria 	<ul style="list-style-type: none"> ● Fusos de máquinas ● Motores industriais ● Trituradores ● Peneiras vibradoras 	<ul style="list-style-type: none"> ● Redutores ● Máquinas para borracha/plástico ● Rolos de calandras ● Máquinas de impressão 	
Máquinas de uso contínuo, mais do que 8 horas por dia		<ul style="list-style-type: none"> ● Laminações ● Escada rolante ● Transportadores ● Centrífugas 	<ul style="list-style-type: none"> ● Ar-condicionado ● Eixos de veículos ferroviários ● Motores grandes ● Bombas compressoras 	<ul style="list-style-type: none"> ● Eixos para locomotivas ● Motores de tração ● Guindastes ● Volante de prensas 	<ul style="list-style-type: none"> ● Máquinas de papel ● Equipamentos para propulsão marítima
Operação contínua de 24 horas, sem interrupções					<ul style="list-style-type: none"> ● Máquinas para suprimentos de água ● Bombas/Ventiladores para minas ● Equipamentos para geração de energia

Fonte: www.ntn.com.br

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

$$L = a_1 \cdot a_{23} \cdot \left(\frac{C}{P} \right)^p \Rightarrow L_h = \frac{L \cdot 10^6}{60 \cdot n}$$

$$L_{neces} = \frac{L_{hdesejado} \cdot 60 \cdot n}{10^6} \Rightarrow \left(\frac{C}{P} \right)_{neces} = \left(\frac{L_{neces}}{a_1 \cdot a_{23}} \right)^{1/p}$$

De posse de $(C/P)_{nec}$ procura-se no catálogo o rolamento que satisfaça.

9.8 – 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 :

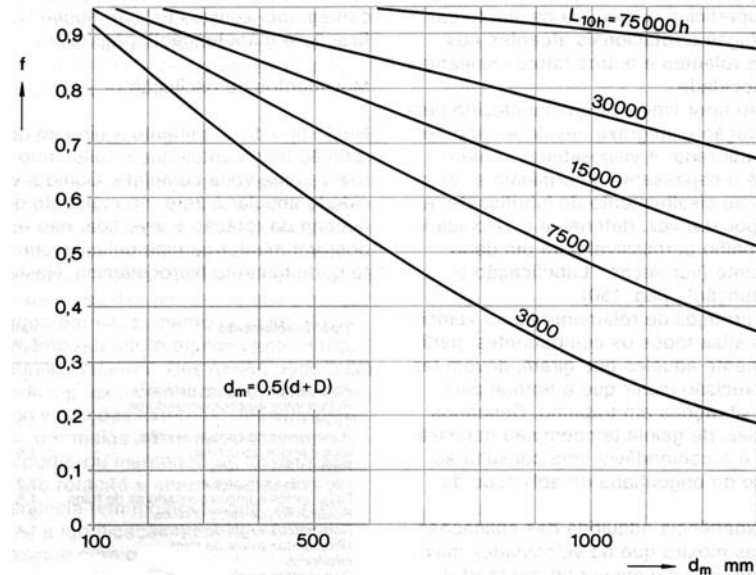
- tipo de rolamento
- tamanho
- carga
- lubrificação
- folga
- gaiola

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 :

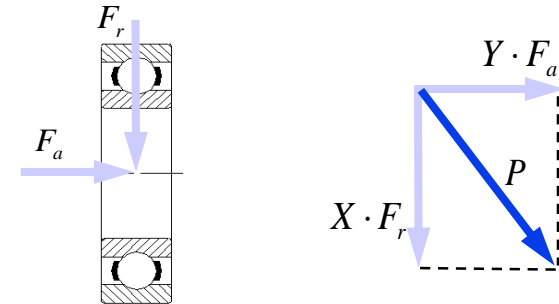
- de esfera
- pequeno
- carga bem baixa
- lubrificação forçada ou spray
- folga maior
- gaiola especial



Catálogo Geral SKF.

9.9 – Momento de Atrito

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



* $\mu = 0.005$ para rolamento axial de rolos
 = 0.001 ~ 0.002 para todos os outros

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

9.10 – Lubrificação de Rolamentos

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

Comparação dos métodos de Lubrificação (catálogo NSK)

Método	Vantagens	Desvantagens
Graxa	<ul style="list-style-type: none"> • Baixo Custo. • Baixa Manutenção. 	<ul style="list-style-type: none"> • Difícil verificação da deterioração da graxa. • Pode ocorrer penetração de impurezas.
Névoa	<ul style="list-style-type: none"> • Uma vez que há sempre óleo novo não há risco de desgaste por deterioração do óleo. • Difícil penetração de sujeira e fluido de corte. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta contaminação do ambiente. • A quantidade de óleo varia com a variação da viscosidade e temperatura do mesmo, dificuldade de controle de fluxo em baixos volumes. • Difícil monitoramento da real lubrificação do rolamento.
Jato de Óleo	<ul style="list-style-type: none"> • Uma vez que o fluxo de óleo é alto, não há penetração de sujeira e fluido de corte. • A temperatura do rolamento pode ser controlada através da temperatura do óleo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto atrito operacional. • Difícil controle de vazamentos. • Impróprio para eixos verticais. • Custo elevado.
Óleo-Ar	<ul style="list-style-type: none"> • Excelente controle do volume de óleo (baixa quantidades). • Baixa geração de calor. • Temperatura do rolamento pode ser controlada pelo fluxo de ar. • Uma vez que há sempre óleo novo não há risco de desgaste por deterioração do óleo. • Difícil penetração de sujeira e fluido de corte devido a alta pressão interna. • Baixa contaminação do ambiente. 	<ul style="list-style-type: none"> • Custo elevado. • Difícil monitoramento da real lubrificação do rolamento.

Métodos de lubrificação com óleo

Banho

- Baixas rotações (até 500 rpm – ver relação com limite de rotação do rolamento no catálogo)
- 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

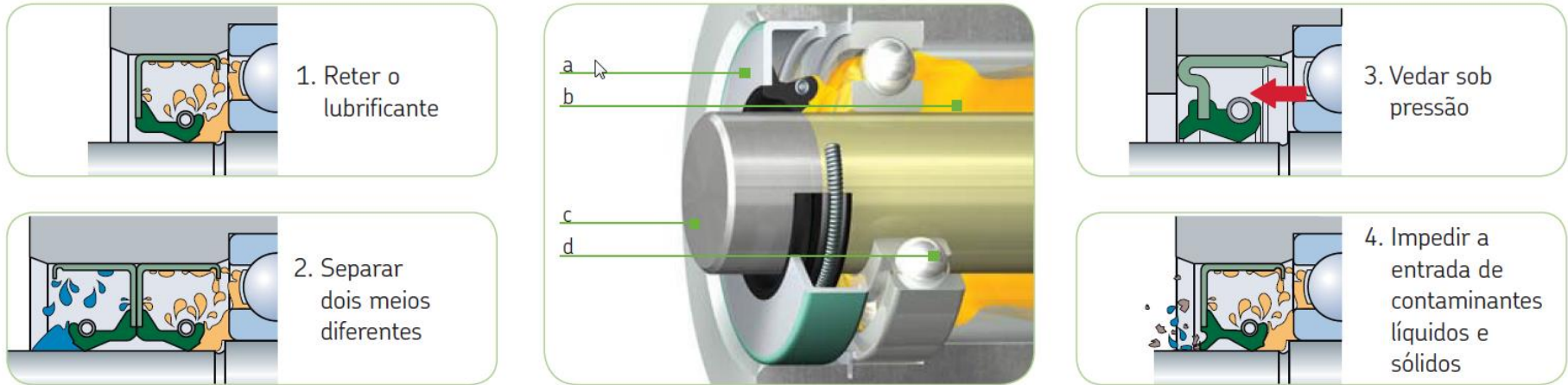
9.10 – Lubrificação de Rolamentos

Comparação dos métodos de Lubrificação (catálogo NTN)

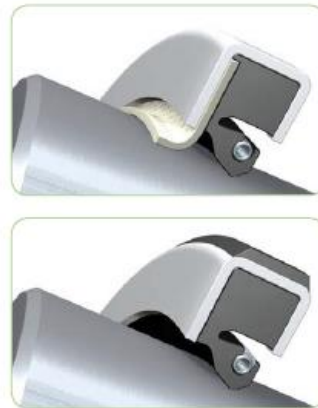
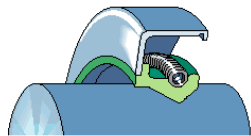
Em relação \ Método	Lubrificação com graxa	Lubrificação com óleo
Manutenção	◎	△
Confiabilidade	○	◎
Efeito de refrigeração	×	○ (Circulação necessária)
Estrutura da vedação	○	△
Perda de força	○	○
Contaminação do meio ambiente	○	△
Altas rotações	×	○

◎ : Muito bom ○ : bom △ : razoável × : pobre

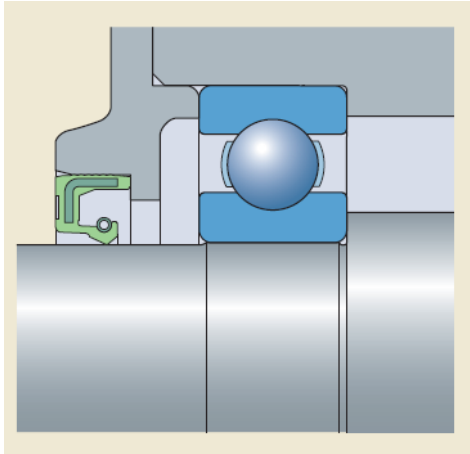
9.11 Vedações



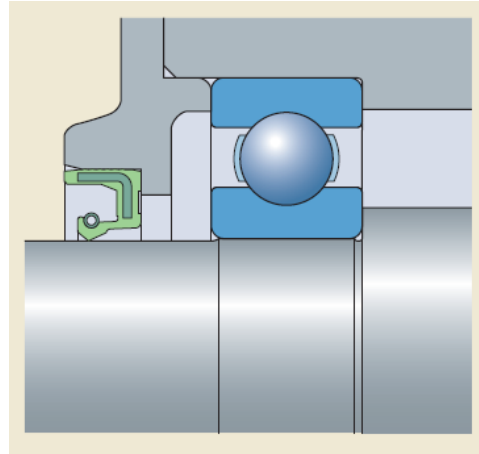
Exemplos



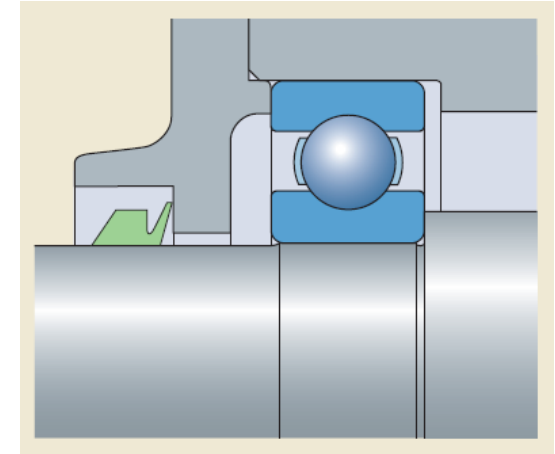
Vedações com contato



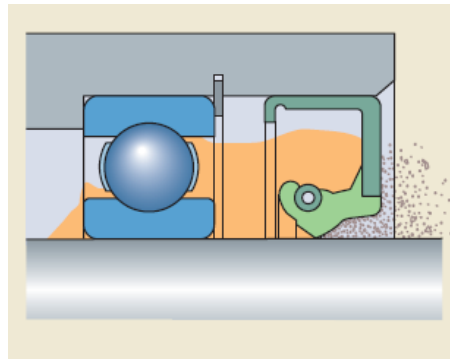
Vedação radial
 Lubrificação com óleo
 Finalidade principal: reter lubrificante
 Temperatura até 190°
 HRC 55
 Ra ≈ 0,2 a 0,8 μm

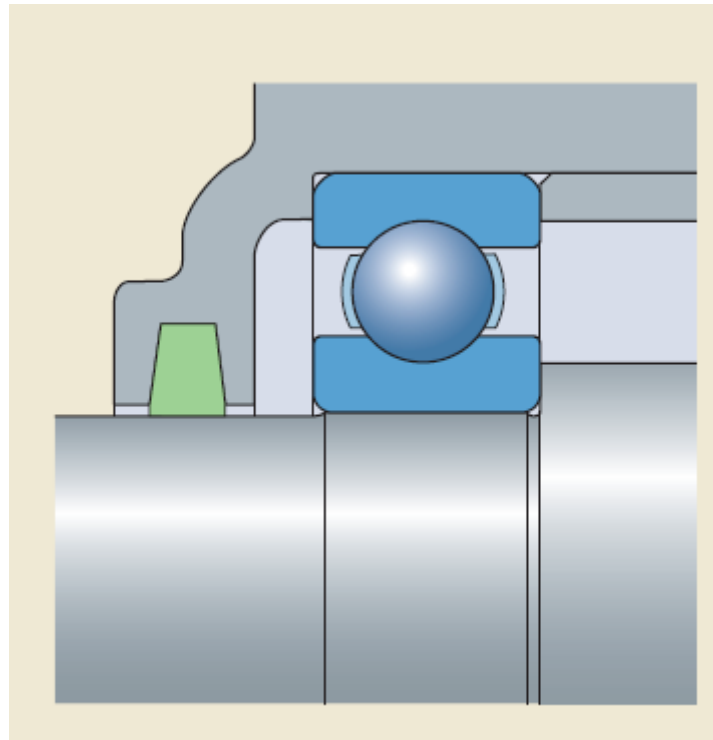


Idem ao anterior
 Finalidade principal:
 excluir contaminantes



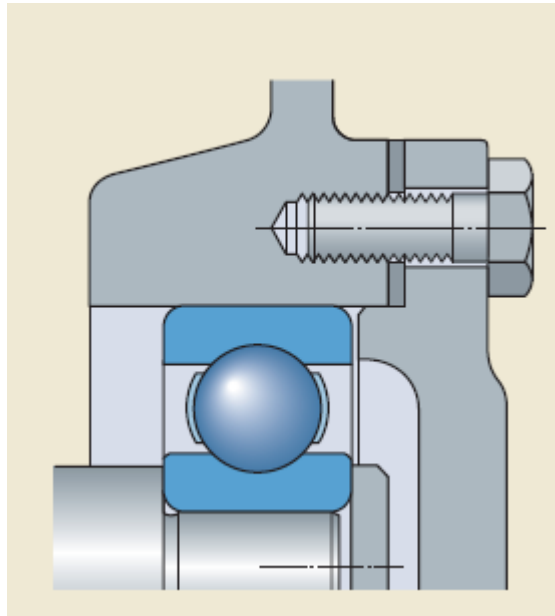
Vedação em V
 Ra ≈ 2 a 3,2 μm
 Temperatura até 150°
 Permite
 desalinhamentos
 relativamente grandes



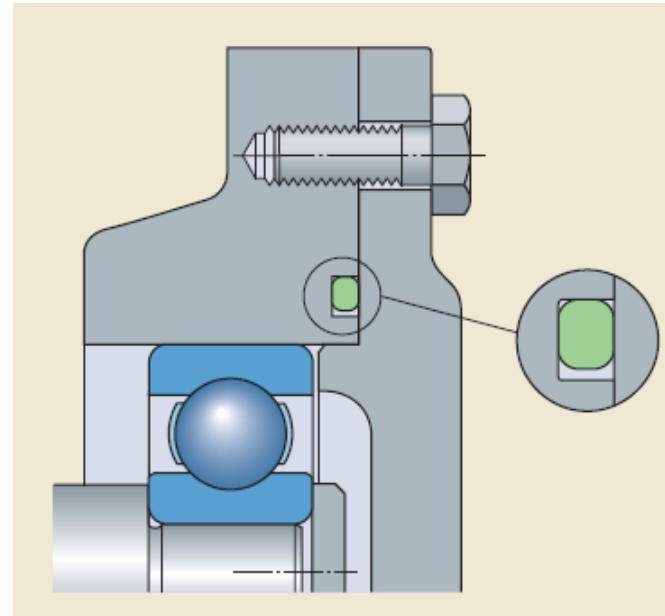


Anéis de feltro. Simples e baratos
Normalmente lubrificação com graxa
Velocidade até 100 m/s
Rugosidade do eixo menor que R_a 3,2 μm

Vedações estáticas

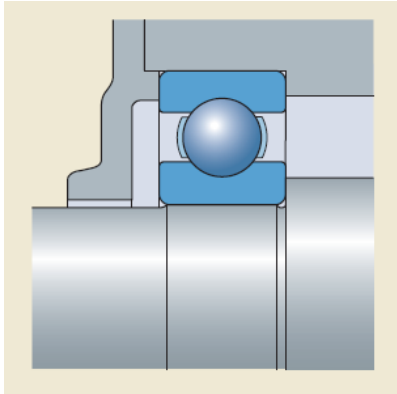


juntas

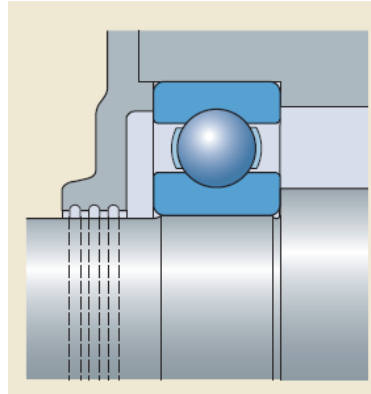


O-rings

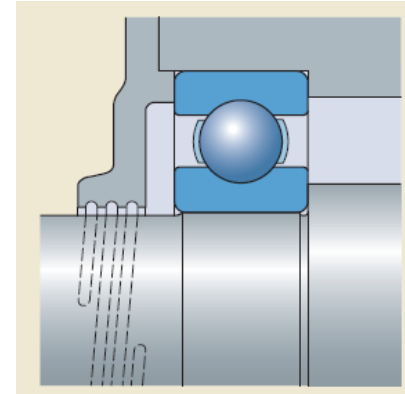
Vedações sem contato



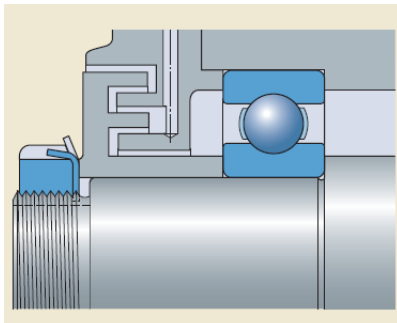
lubrificação com graxa
ambiente seco e livre de pó



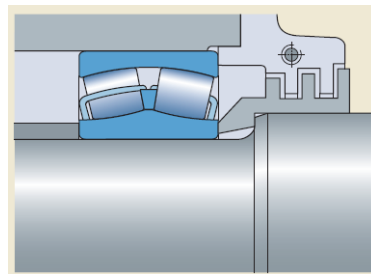
lubrificação com graxa
ambiente seco e livre de pó
Mais eficaz contra contaminantes



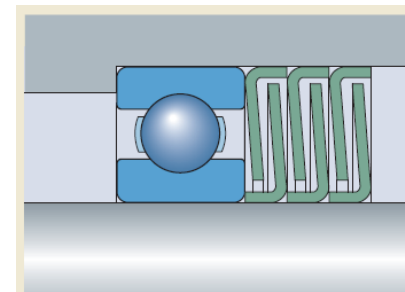
lubrificação com óleo
Canais helicoidais retornam o óleo
Não pode haver reversão



Labirinto axial. Normalmente com
graxa.
Mais eficaz que fresta

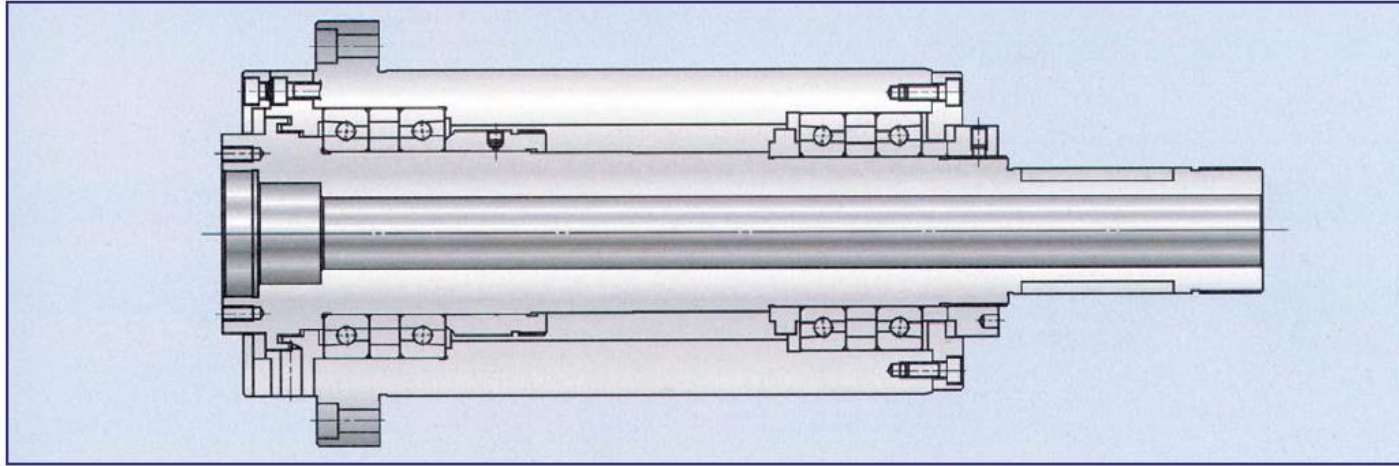


Labirinto radial. Normalmente com
graxa. Mancal bipartido
Mais eficaz que fresta

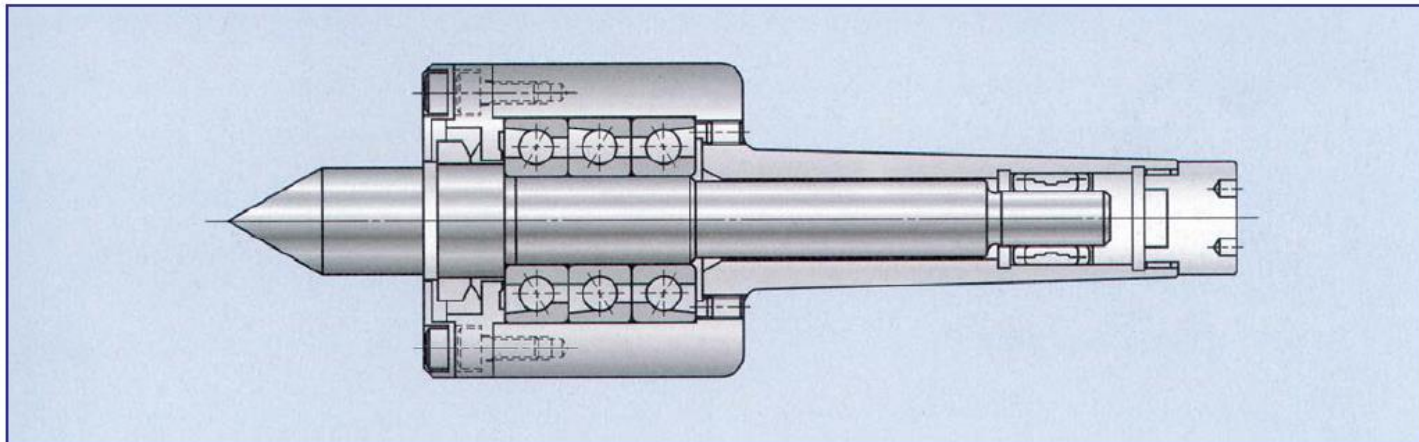


Arruelas de vedação:
Mais econômicas

9.12 – Exemplos em Máquinas Ferramentas de Precisão (SKF)

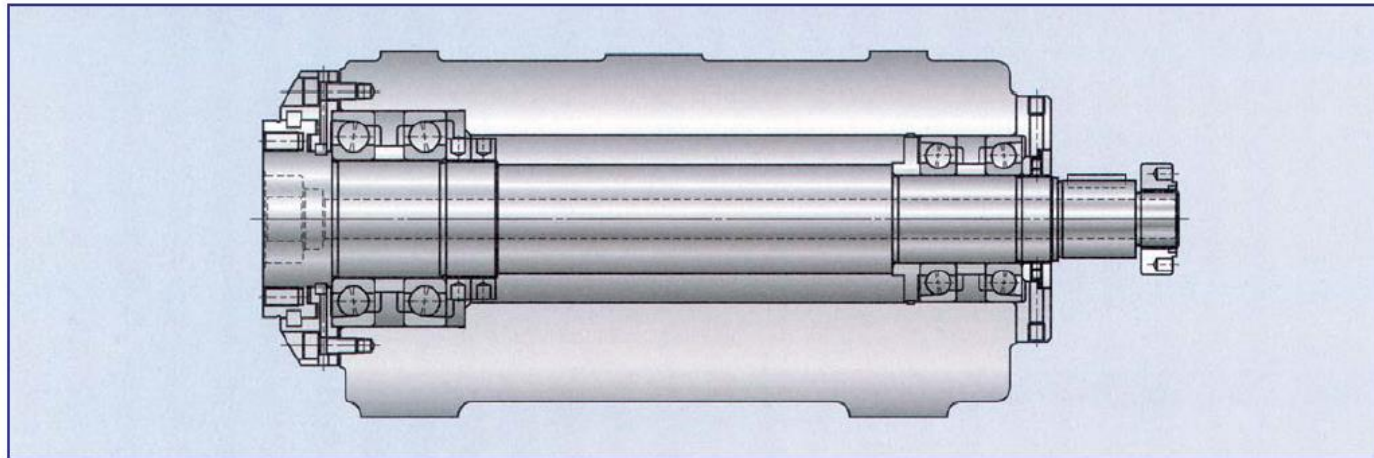


Fuso de Alta Precisão para Torno Mecânico

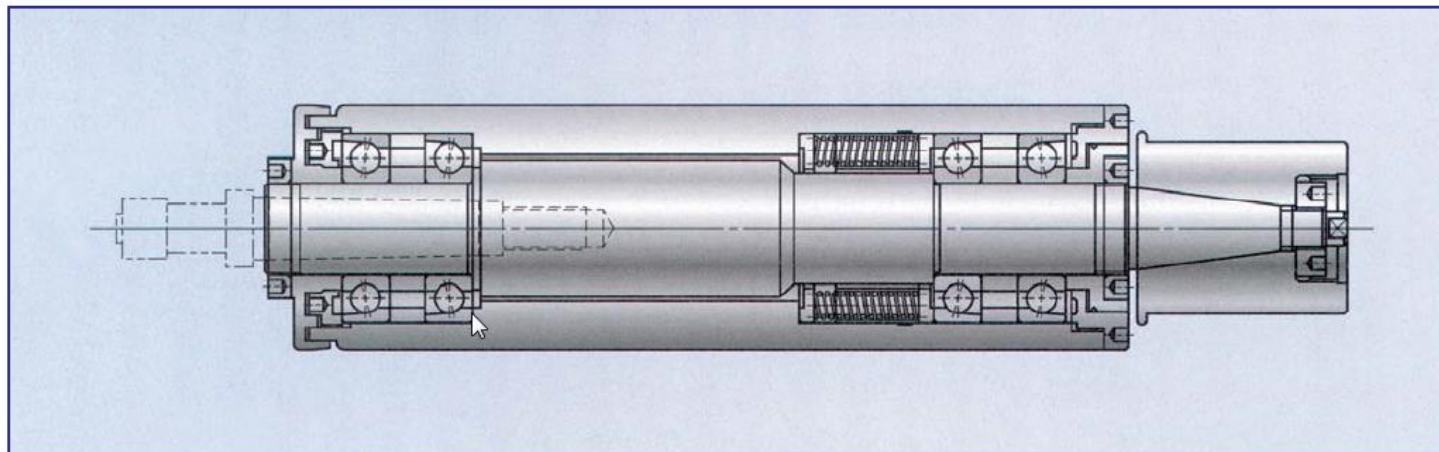


Contraponto

9.12 – Exemplos em Máquinas Ferramentas de Precisão (SKF)



Cabeçote de Furação



Fuso para Retífica