

Exercício

A figura abaixo representa um eixo de um determinado mecanismo utilizado em uma máquina ferramenta que trabalha continuamente durante 8 horas diárias. Durante seu funcionamento as cargas atuantes variam conforme a tabela abaixo:

Tempo [min]	F_{rA} [N]	F_{rB} [N]	F_a [N]	Rotação [rpm]
12	7600	6400	4000	400
26	6400	6100	3700	630
22	7200	5200	2400	500



São dados:

- diâmetro do assento de rolamento no eixo: 50 mm, em ambos os lados;
- temperatura de serviço: 80° C;
- Vida requerida dos rolamentos : 10.000 h
- direção das forças constantes; existe inversão do sentido de rotação e conseqüente variação do sentido da força axial;
- adotar $f = 1,1$;
- montagem e lubrificação confiáveis;
- ambiente de serviço com muita poeira e líquidos;
- fixações dos rolamentos, dimensões e tolerâncias nas partes em contato com rolamento.

Efetuar o dimensionamento completo (estático e dinâmico) dos rolamentos com uma confiabilidade de 95 %.

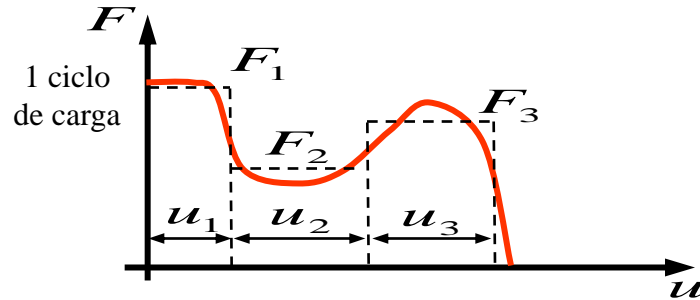
Resolução:

Dimensionar os rolamentos, o que significa ?

1. Dimensionamento estático;
2. Dimensionamento dinâmico;
3. Escolher o óleo e método de lubrificação;
4. Verificar rotação ($n_{\text{máx}}$);
5. Calcular momentos de atrito;
6. Escolher vedadores;
7. Fazer desenho ilustrativo de montagem no eixo.

1. Dimensionamento estático

a. cálculo da carga média



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

u_i : número de rotações

Rotação média: $n_{medio} = \frac{total\ rotações}{tempo}$

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

$$F_{calc} = f \cdot F_{teoricas}$$

$$f = 1.0 \sim 3.0$$

dependendo das incertezas acima

Tempo (min)	R _A	R _B	Axial	rpm	u (n. rotações)
12	7600	6400	4000	400	4800
26	6400	6100	3700	630	16380
22	7200	5200	2400	500	11000
	R _A medio	R _B medio	Axial medio	Total u	32180
cargas medias	6886	5874	3422		
f=1,1	7574	6462	3764		

Rotação média:

$$n_{\text{medio}} = \frac{\text{total rotações}}{\text{tempo}} = \frac{32180}{60} = 536,33 \text{ rpm}$$

Rotação média: 540 rpm (adotado) (Catálogo SKF, pg. Xxx)

b. Cálculo da carga estática equivalente e escolha inicial

Dada a configuração mostrada, escolhe-se inicialmente rolamento rígido de esferas (pg. 312), para ambos os apoios (A e B).

Considerando o mesmo rolamento para ambos os lados, escolher-se-á aquele com maiores cargas, ou seja:

$$F_r = 7574 \text{ N} \quad \text{e} \quad F_a = 3764 \text{ N}$$

Carga estática equivalente no rolamento (pg. 316):

$$P_0 = X_0 F_r + Y_0 F_a$$

$$P_0 = 0,6F_r + 0,5F_a$$

$$\text{se } P_0 < F_r \quad \rightarrow \quad P_0 = F_r$$

$$\text{Neste caso:} \quad P_0 = 0,6 \cdot 7574 + 0,5 \cdot 3764 = 6427 \text{ N} \quad \text{como } P_0 < F_r \quad \rightarrow \quad P_0 = 7574 \text{ N}$$

Capacidade de carga estática C_0 :

$$C_0 \geq s_0 P_0$$

Tabela 11

Valores de referência para o fator de segurança estática s_0

Tipo de operação	Rolamento rotativo Requisitos de desempenho (por exemplo, giro silencioso ou operação sem vibração) insignificante						Rolamento sem rotação	
			normal		alta			
	Rolamentos de esferas	Rolamentos de rolos	Rolamentos de esferas	Rolamentos de rolos	Rolamentos de esferas	Rolamentos de rolos	Rolamentos de esferas	Rolamentos de rolos
Sem problemas, 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⁾	$\geq 1,5$	$\geq 2,5$	$\geq 1,5$	≥ 3	≥ 2	≥ 4	≥ 1	≥ 2

Para rolamentos axiais de rolos de esferas, é aconselhável utilizar $s_0 \geq 4$.

¹⁾ Onde a magnitude da carga de choque for desconhecida, os valores de s_0 pelo menos tão grandes quanto os citados acima, devem ser utilizados. Se a magnitude das cargas de choque for conhecida com precisão, valores menores que s_0 podem ser aplicados. (pg. 89)

Portanto: $s_0 = 1$

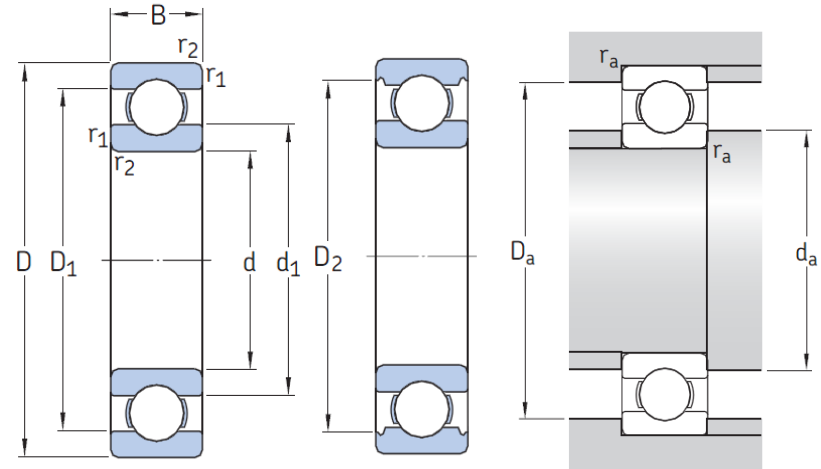
$$C_0 \geq 1.7574 = 7574 \text{ N}$$



Catálogo

Sabendo-se que o diâmetro do eixo no assento do rolamento é 50mm, e da capacidade de carga estática C_0 calculada, Faz-se a escolha inicial do rolamento no catálogo, pg. 328:

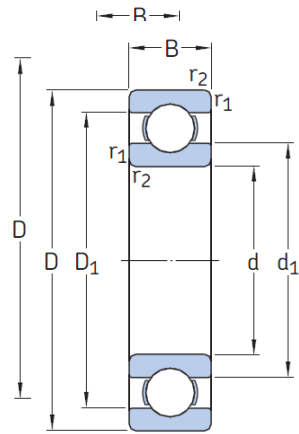
1.1 Rolamentos rígidos de uma carreira de esferas
d de 40 a 55 mm



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	–

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				–

Dimensões principais			Classificações básicas de carga		Limite de carga de fadiga P_u	Classificações de velocidade		Massa kg	Designação
d	D	B	dinâmica C	estática C_0		Velocidade de referência	Velocidade-limite		
mm			kN		kN	r/min			-
50	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
	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



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				
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

Rolamento escolhido: **SKF 61910**

características: $d = 50 \text{ mm}$; $D = 72 \text{ mm}$; $C = 14600\text{N}$; $C_0 = 11800 \text{ N}$; Carga de Fadiga: $P_u = 500 \text{ N}$
 Velocidades: referência:19000 rpm; limite: 12000 rpm ; $K_r = 0,02$; $f_0 = 16$

2. Dimensionamento dinâmico

a. Cálculo da carga dinâmica equivalente

Carga dinâmica equivalente no rolamento (pg. 316):

se $F_a/F_r \leq e \rightarrow P = F_r$
 se $F_a/F_r > e \rightarrow P = X F_r + Y F_a$

$$F_a/F_r = 3764 / 7574 = 0,497$$

Valores de e, X e Y, Tabela pg.315: $f_0.F_a/C_0 = 16. 3764/11800 = 5,10$

Tabela 8

Fatores de cálculo para rolamentos rígidos de esferas

$f_0 F_a/C_0$	Rolamentos de uma e de duas carreiras Folga normal			Rolamentos de uma carreira Folga C3			Folga C4		
	e	X	Y	e	X	Y	e	X	Y
0,172	0,19	0,56	2,3	0,29	0,46	1,88	0,38	0,44	1,47
0,345	0,22	0,56	1,99	0,32	0,46	1,71	0,4	0,44	1,4
0,689	0,26	0,56	1,71	0,36	0,46	1,52	0,43	0,44	1,3
1,03	0,28	0,56	1,55	0,38	0,46	1,41	0,46	0,44	1,23
1,38	0,3	0,56	1,45	0,4	0,46	1,34	0,47	0,44	1,19
2,07	0,34	0,56	1,31	0,44	0,46	1,23	0,5	0,44	1,12
3,45	0,38	0,56	1,15	0,49	0,46	1,1	0,55	0,44	1,02
5,17	0,42	0,56	1,04	0,54	0,46	1,01	0,56	0,44	1
6,89	0,44	0,56	1	0,54	0,46	1	0,56	0,44	1

Como: $F_a/F_r = 0,497 > e = 0,42 \rightarrow P = X F_r + Y F_a$

$P = 0,56.7574 + 1,04. 3764 = 8156 \text{ N}$

b. Cálculo da vida

Vida em milhões de ciclos (L): $L = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot \left(\frac{C}{P}\right)^p \rightarrow a_1 \cdot a_{23} \cdot \left(\frac{C}{P}\right)^p \rightarrow a_1 \cdot a_{skf} \cdot \left(\frac{C}{P}\right)^p$

Vida em horas (L_h): $L_h = \frac{10^6}{60 \cdot n} \cdot L$

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

b1. Confiabilidade

a_1 = fator de ajuste de vida para confiabilidade (valores de acordo com a norma ISO 281), pg. 65.

$a_1 = 0,64$

Tabela 1

Valores para o fator de ajuste de vida útil a_1

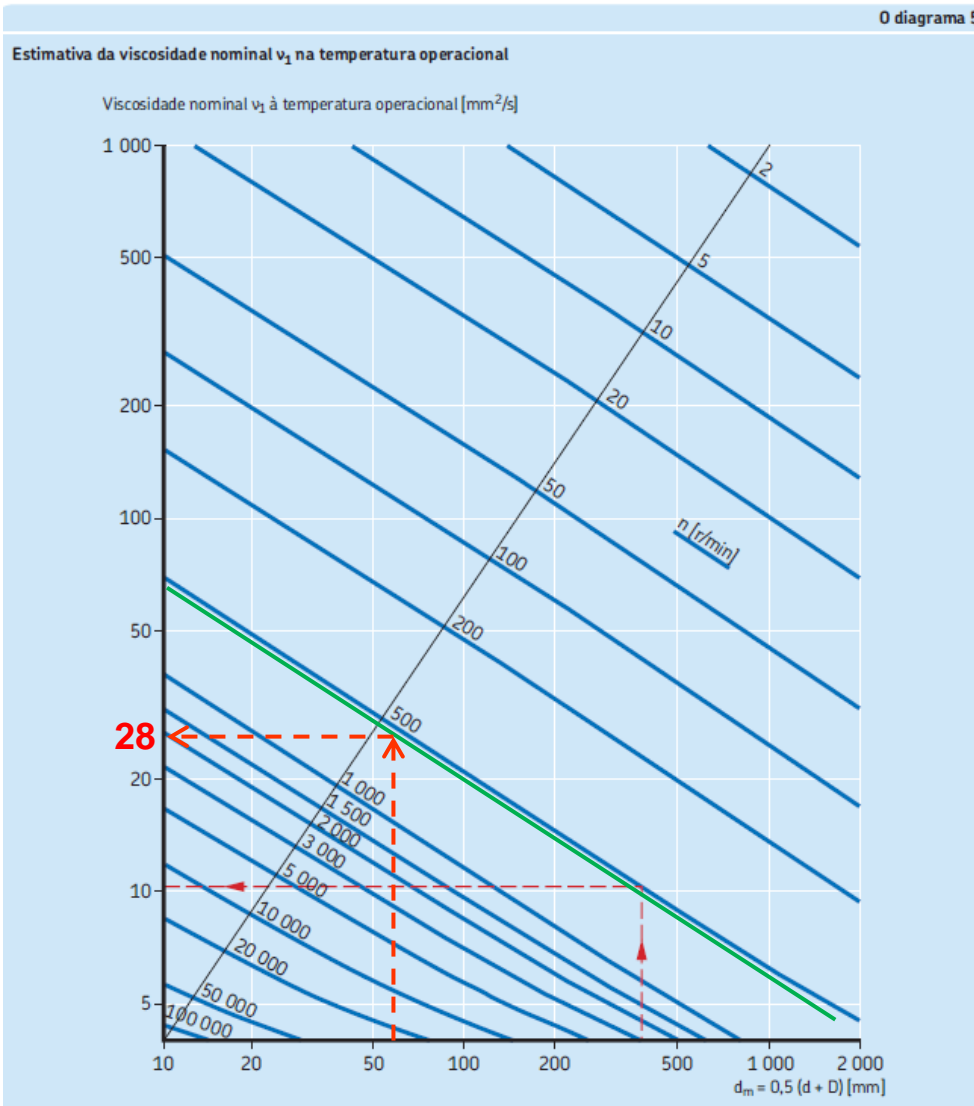
Confiabilidade	Probabilidade de falha n	Vida nominal SKF L_{nm}	Fator a_1
%	%	milhões de revoluções	-
90	10	L_{10m}	1
95	5	L_{5m}	0,64
96	4	L_{4m}	0,55
97	3	L_{3m}	0,47
98	2	L_{2m}	0,37
99	1	L_{1m}	0,25

b2. Fator a_{skf}

Passos:

1. Determinação da viscosidade necessária à temperatura operacional, diagrama 5, pg. 72
2. Escolha do lubrificante, diagrama 6, pg. 73
3. Cálculo das relações de viscosidades e fator de contaminação;
4. Determinação do fator a_{skf} , diagrama 1, pg. 66

1. Determinação da viscosidade necessária à temperatura operacional (80° C), diagrama 5, pg. 72



Diâmetro médio do rolamento (d_m):

$$d_m = 0,5. (d + D)$$

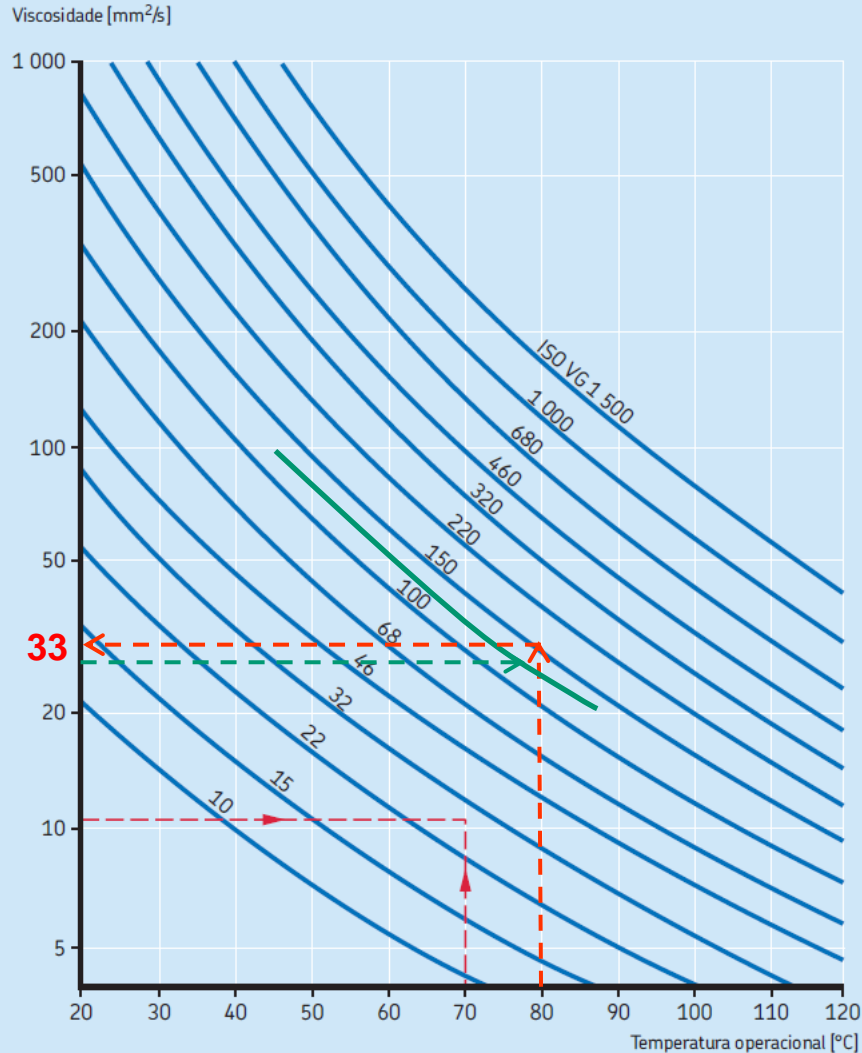
$$d_m = 0,5. (50 + 72) = 61 \text{ mm}$$

rotação (n): 540 rpm

Viscosidade = 28 mm²/s

2. Escolha do lubrificante, diagrama 6, pg. 73

Diagrama de viscosidade-temperatura para os graus de viscosidade ISO (Óleos minerais, índice de viscosidade 95)



Viscosidade desejada a 80° C = 28 mm²/s

Óleo escolhido: **ISO VG150**, cuja viscosidade a 80° C é 33 mm²/s, valor aproximado retirado do diagrama 6, ao lado.

Lubrificação a óleo: ISO VG150

3. Cálculo das relações de viscosidades e fator de contaminação

ν_1 = Viscosidade desejada a 80° C = 28 mm²/s (ν_1)

$$k = \frac{\vartheta}{\vartheta_1} = \frac{33}{28} = 1,178$$

ν = viscos. óleo escolhido: **ISO VG150**, viscosidade = 33 mm²/s

Para o cálculo do fator de ajuste para lubrificação a SKF sugere a relação: $\eta_c \cdot \frac{P_u}{P}$
(diagrama 1, pg.66)

η_c : fator de contaminação, tabela 4, pg74 → $\eta_c = 0,6$ a $0,5$ → **$\eta_c = 0,55$**

P_u : carga limite de fadiga (tabela de rolamentos)

P ; carga dinâmica equivalente

$$\eta_c \cdot \frac{P_u}{P} = 0,55 \cdot \frac{500}{8156} = \mathbf{0,033}$$

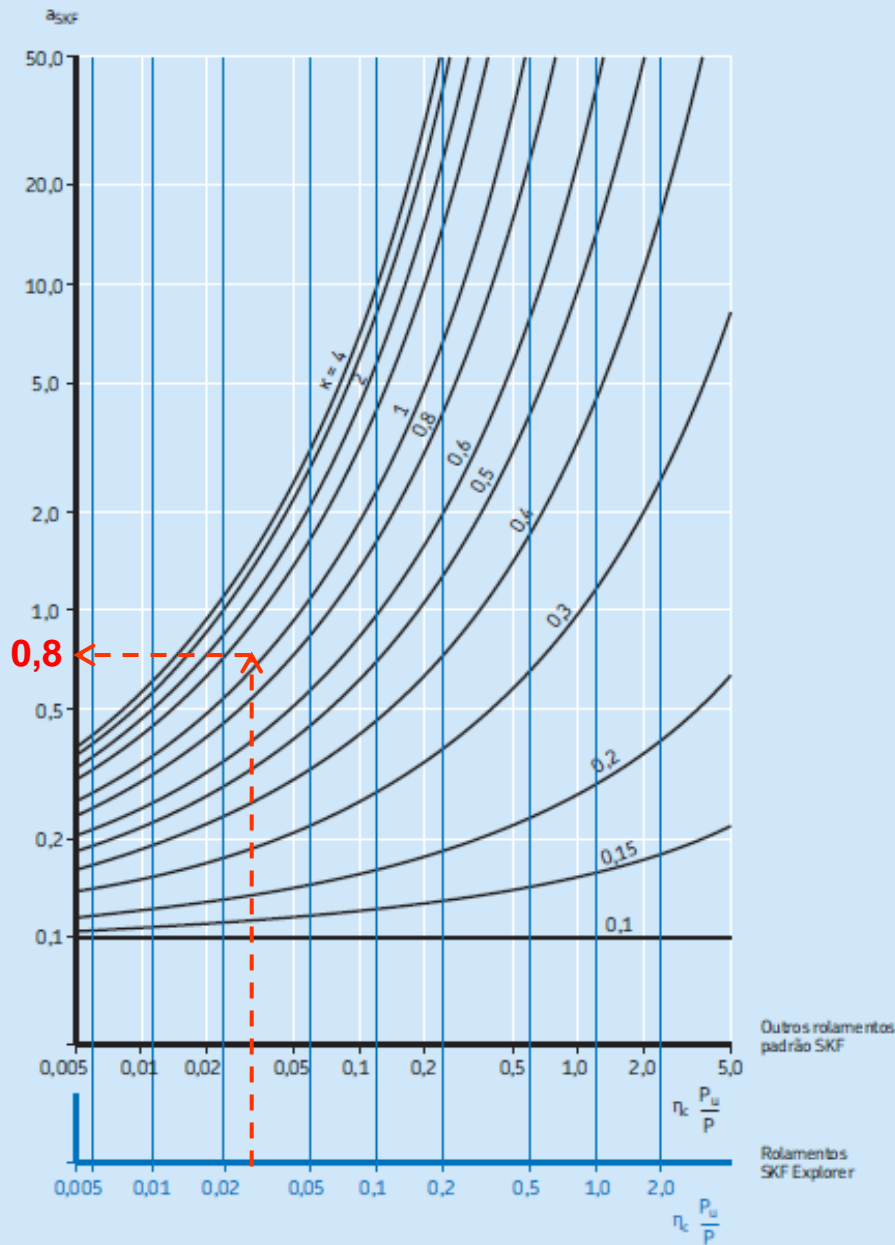
Tabela 4

 Valores de referência para o fator η_c para diferentes níveis de contaminação

Condições	Fator $\eta_c^{1)}$ para rolamentos com diâmetro médio	
	$d_m < 100$ mm	$d_m \geq 100$ mm
Limpeza extrema <ul style="list-style-type: none"> tamanho aproximado das partículas da mesma espessura do filme lubrificante condições laboratoriais 	1	1
Alto nível de limpeza <ul style="list-style-type: none"> óleo filtrado através de filtro extremamente fino condições típicas: os rolamentos vedados são lubrificadas para toda a vida útil 	0,8 ... 0,6	0,9 ... 0,8
Limpeza normal <ul style="list-style-type: none"> óleo filtrado através de um filtro fino condições típicas: os rolamentos com placas de proteção são lubrificadas para a vida 	0,6 ... 0,5	0,8 ... 0,6
Leve contaminação <ul style="list-style-type: none"> condições típicas: rolamentos sem vedações integradas, filtragem grosseira, partículas de desgaste e leve infiltração de contaminantes 	0,5 ... 0,3	0,6 ... 0,4
Contaminação típica <ul style="list-style-type: none"> condições típicas de rolamentos sem vedações integradas, filtragem grosseira, partículas de desgaste e entrada de contaminantes 	0,3 ... 0,1	0,4 ... 0,2
Contaminação grave <ul style="list-style-type: none"> condições típicas: altos níveis de contaminação, devido a desgaste excessivo e/ou vedações ineficientes arranjo de rolamentos com vedações ineficientes ou com danos 	0,1 ... 0	0,1 ... 0
Contaminação muito grave <ul style="list-style-type: none"> condições típicas: níveis de contaminação tão severas que os valores de η_c estão fora da escala, o que reduz significativamente a vida do rolamento 	0	0

¹⁾ A escala para η_c refere-se apenas a contaminantes sólidos típicos. Contaminantes como água ou outros fluidos prejudiciais à vida do rolamento não está incluída. Devido ao desgaste abrasivo em ambientes altamente contaminados ($\eta_c = 0$), a vida útil de um rolamento pode ser significativamente mais curta que a vida nominal.

Fator a_{SKF} para rolamentos de esferas radiais



$$a_{skf} = a_{23} = 0,8$$

Se $\kappa > 4$, utilize a curva para $\kappa = 4$.

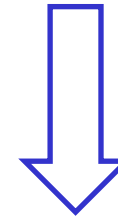
Conforme o valor de $\eta_c \cdot (P_u/P)$ tender a zero, a_{SKF} tende a 0,1 para todos os valores de κ .

Vida em milhões de ciclos (L):
$$L = a_1 \cdot a_{23} \cdot \left(\frac{C}{P}\right)^p = 0,64 \cdot 0,8 \cdot \left(\frac{14600}{8156}\right)^3 = 29,369$$

Vida em horas (L_h):
$$L_h = \frac{10^6}{60 \cdot n} \cdot L = \frac{10^6}{60 \cdot 540} \cdot 29,369 = \mathbf{906,47 \text{ h}}$$

Vida requerida em horas (enunciado) : 10.000 h

Rolamento não atende !!!



Escolher outro rolamento e refazer !!!

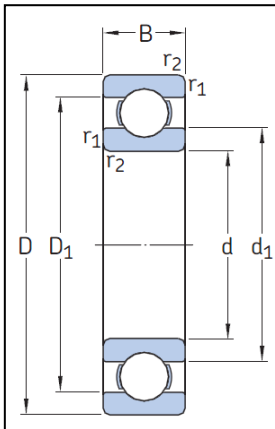
Como refazer ???

1. Ir à tabela de rolamentos e escolher rolamento com maior capacidade de carga

(mas qual?) → Tentativa e erro...

2. Cálculo indireto (para facilitar a escolha)

1. Ir à tabela de rolamentos e escolher rolamento com maior capacidade de carga (mas qual?) → Tentativa e erro...



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	-
50	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
	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



2. Cálculo dinâmico indireto (para facilitar a escolha)

Vida em milhões de ciclos (L):
$$L = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot \left(\frac{C}{P}\right)^p \rightarrow a_1 \cdot a_{23} \cdot \left(\frac{C}{P}\right)^p \rightarrow a_1 \cdot a_{skf} \cdot \left(\frac{C}{P}\right)^p$$

Vida em horas (L_h):

$$L_h = \frac{10^6}{60 \cdot n} \cdot L$$

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

Vida requerida em horas (enunciado) : 10.000 h

$$10000 = \frac{10^6}{60 \cdot 540} \cdot L \rightarrow L = 324$$

Considerações:

$$a_1 = 0,64 \text{ (confiabilidade)}$$

$$a_{skf} = 1,0 \text{ (aproximação)}$$

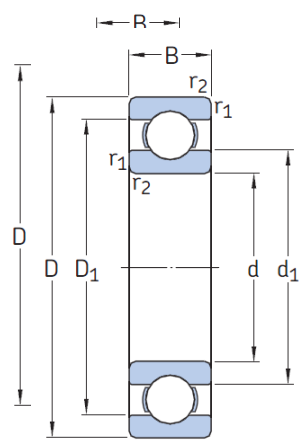
$$P = P_r \text{ (no mínimo)} = 7574 \text{ N (aproximação)}$$

$$324 = 0,64 \cdot 1,0 \cdot \left(\frac{C}{7574}\right)^3 \rightarrow C = 60365 \text{ N}$$



Tabela de rolamentos!

Dimensões principais			Classificações básicas de carga		Limite de carga de fadiga P_u	Classificações de velocidade		Massa kg	Designação
d	D	B	dinâmica C	estática C_0		Velocidade de referência	Velocidade-limite		
mm			kN		kN	r/min			-
50	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
	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



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				
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

Rolamento escolhido: **SKF 6310**

características: $d = 50 \text{ mm}$; $D = 110 \text{ mm}$; $C = 65000 \text{ N}$; $C_0 = 38000 \text{ N}$; Carga de Fadiga: $P_u = 1600 \text{ N}$
 Velocidades: referência: 13000 rpm ; limite: 8500 rpm ; $K_r = 0,03$; $f_0 = 13$

2. Dimensionamento dinâmico para o novo rolamento

a. Cálculo da carga dinâmica equivalente

Carga dinâmica equivalente no rolamento (pg. 316):

se $F_a/F_r \leq e \rightarrow P = F_r$
 se $F_a/F_r > e \rightarrow P = X F_r + Y F_a$

$$F_a/F_r = 3764 / 7574 = 0,497$$

Valores de e, X e Y, Tabela pg.315: $f_0 \cdot F_a/C_0 = 13 \cdot 3764/38000 = 1,287$

Tabela 8

Fatores de cálculo para rolamentos rígidos de esferas

$f_0 F_a/C_0$	Rolamentos de uma e de duas carreiras Folga normal			Rolamentos de uma carreira Folga C3			Folga C4		
	e	X	Y	e	X	Y	e	X	Y
0,172	0,19	0,56	2,3	0,29	0,46	1,88	0,38	0,44	1,47
0,345	0,22	0,56	1,99	0,32	0,46	1,71	0,4	0,44	1,4
0,689	0,26	0,56	1,71	0,36	0,46	1,52	0,43	0,44	1,3
1,03	0,28	0,56	1,55	0,38	0,46	1,41	0,46	0,44	1,23
1,38	0,3	0,56	1,45	0,4	0,46	1,34	0,47	0,44	1,19
2,07	0,34	0,56	1,31	0,44	0,46	1,23	0,5	0,44	1,12
3,45	0,38	0,56	1,15	0,49	0,46	1,1	0,55	0,44	1,02
5,17	0,42	0,56	1,04	0,54	0,46	1,01	0,56	0,44	1
6,89	0,44	0,56	1	0,54	0,46	1	0,56	0,44	1

Como: $F_a/F_r = 0,497 > e = 0,3 \rightarrow P = X F_r + Y F_a$

$P = 0,56.7574 + 1,45. 3764 = 9700 \text{ N}$

b. Cálculo da vida

Vida em milhões de ciclos (L): $L = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot \left(\frac{C}{P}\right)^p \rightarrow a_1 \cdot a_{23} \cdot \left(\frac{C}{P}\right)^p \rightarrow a_1 \cdot a_{skf} \cdot \left(\frac{C}{P}\right)^p$

Vida em horas (L_h): $L_h = \frac{10^6}{60 \cdot n} \cdot L$

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

b1. Confiabilidade

a_1 = fator de ajuste de vida para confiabilidade (valores de acordo com a norma ISO 281), pg. 65.

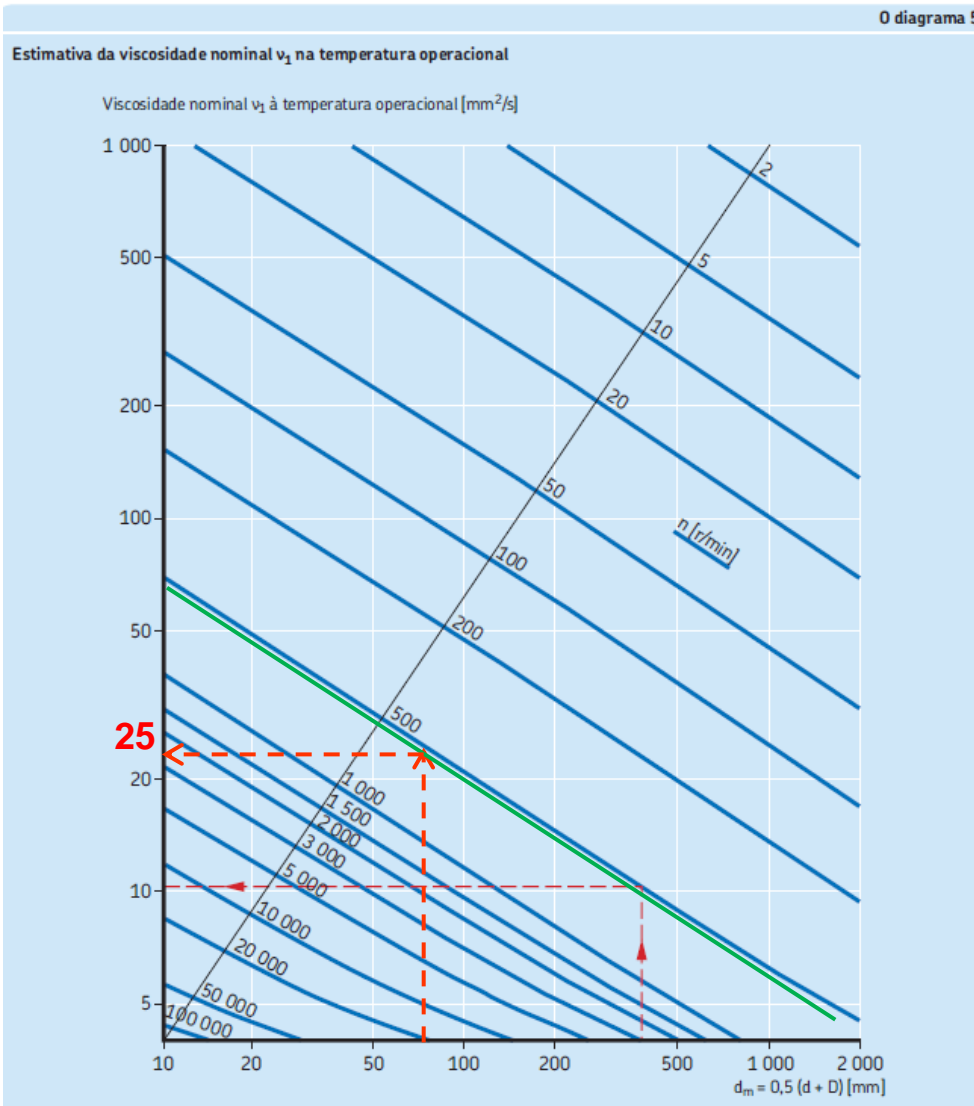
$a_1 = 0,64$

Tabela 1

Valores para o fator de ajuste de vida útil a_1

Confiabilidade	Probabilidade de falha n	Vida nominal SKF L_{nm}	Fator a_1
%	%	milhões de revoluções	-
90	10	L_{10m}	1
95	5	L_{5m}	0,64
96	4	L_{4m}	0,55
97	3	L_{3m}	0,47
98	2	L_{2m}	0,37
99	1	L_{1m}	0,25

1. Determinação da viscosidade necessária à temperatura operacional (80° C), diagrama 5, pg. 72



Diâmetro médio do rolamento (d_m):

$$d_m = 0,5 \cdot (d + D)$$

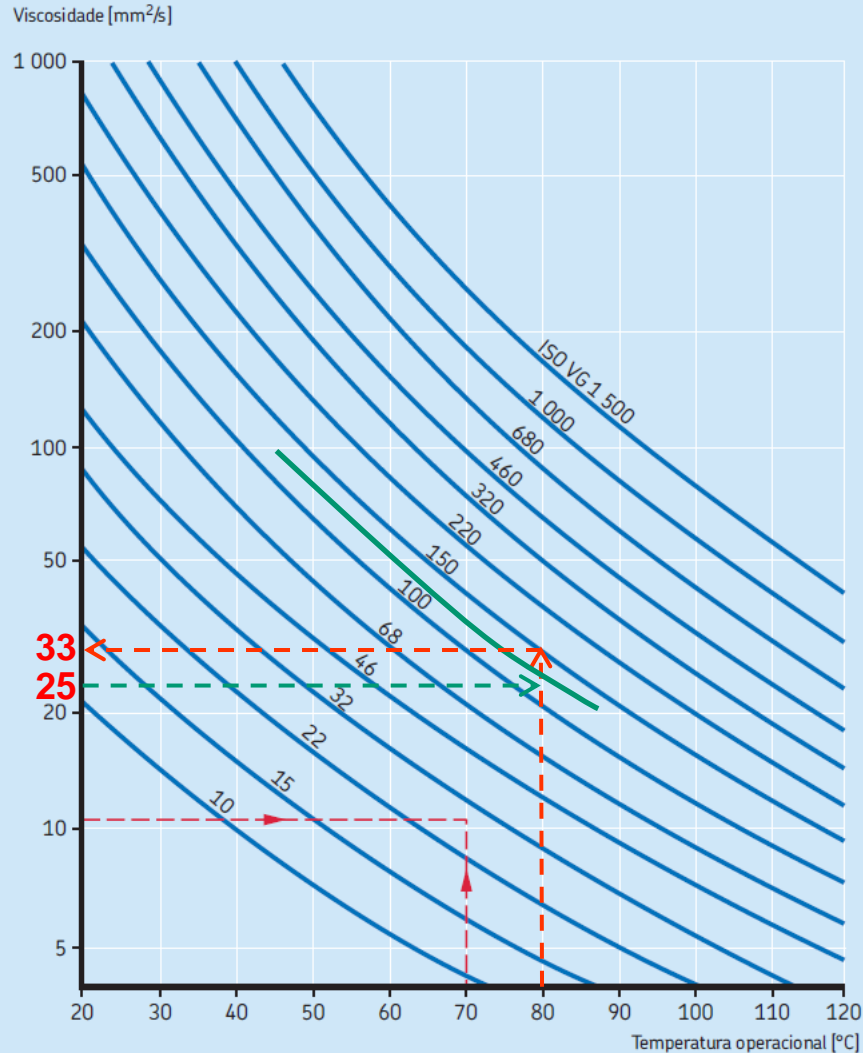
$$d_m = 0,5 \cdot (50 + 110) = 80 \text{ mm}$$

rotação (n): 540 rpm

Viscosidade = 25 mm²/s

2. Escolha do lubrificante, diagrama 6, pg. 73

Diagrama de viscosidade-temperatura para os graus de viscosidade ISO (Óleos minerais, índice de viscosidade 95)



Viscosidade desejada a 80° C = 25 mm²/s

Óleo escolhido: **ISO VG150**, cuja viscosidade a 80° C é 33 mm²/s, valor aproximado retirado do diagrama 6, ao lado.

3. Cálculo das relações de viscosidades e fator de contaminação

ν_1 = Viscosidade desejada a 80° C = 25 mm²/s (ν_1)

$$k = \frac{\vartheta}{\vartheta_1} = \frac{33}{25} = 1,32$$

ν = viscos. óleo escolhido: **ISO VG150**, viscosidade = 33 mm²/s

Para o cálculo do fator de ajuste para lubrificação a SKF sugere a relação: $\eta_c \cdot \frac{P_u}{P}$
 (diagrama 1, pg.66)

η_c : fator de contaminação, tabela 4, pg74 $\rightarrow \eta_c = 0,6$ a $0,5 \rightarrow \eta_c = 0,55$

P_u : carga limite de fadiga (tabela de rolamentos)

$$\eta_c \cdot \frac{P_u}{P} = 0,55 \cdot \frac{1600}{9700} = 0,090$$

P ; carga dinâmica equivalente

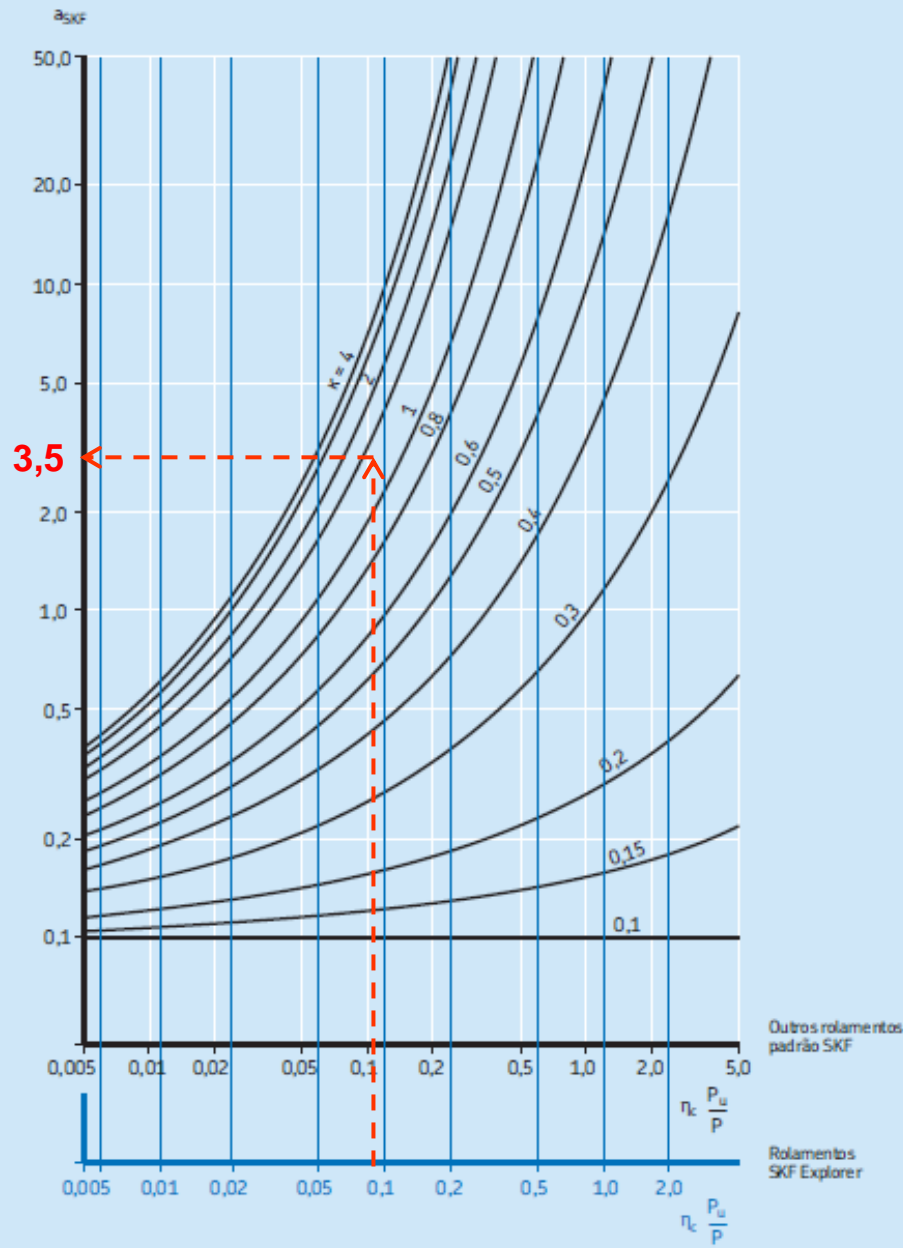
Tabela 4

 Valores de referência para o fator η_c para diferentes níveis de contaminação

Condições	Fator $\eta_c^{1)}$ para rolamentos com diâmetro médio	
	$d_m < 100$ mm	$d_m \geq 100$ mm
Limpeza extrema <ul style="list-style-type: none"> tamanho aproximado das partículas da mesma espessura do filme lubrificante condições laboratoriais 	1	1
Alto nível de limpeza <ul style="list-style-type: none"> óleo filtrado através de filtro extremamente fino condições típicas: os rolamentos vedados são lubrificados para toda a vida útil 	0,8 ... 0,6	0,9 ... 0,8
Limpeza normal <ul style="list-style-type: none"> óleo filtrado através de um filtro fino condições típicas: os rolamentos com placas de proteção são lubrificados para a vida 	0,6 ... 0,5	0,8 ... 0,6
Leve contaminação <ul style="list-style-type: none"> condições típicas: rolamentos sem vedações integradas, filtragem grosseira, partículas de desgaste e leve infiltração de contaminantes 	0,5 ... 0,3	0,6 ... 0,4
Contaminação típica <ul style="list-style-type: none"> condições típicas de rolamentos sem vedações integradas, filtragem grosseira, partículas de desgaste e entrada de contaminantes 	0,3 ... 0,1	0,4 ... 0,2
Contaminação grave <ul style="list-style-type: none"> condições típicas: altos níveis de contaminação, devido a desgaste excessivo e/ou vedações ineficientes arranjo de rolamentos com vedações ineficientes ou com danos 	0,1 ... 0	0,1 ... 0
Contaminação muito grave <ul style="list-style-type: none"> condições típicas: níveis de contaminação tão severas que os valores de η_c estão fora da escala, o que reduz significativamente a vida do rolamento 	0	0

¹⁾ A escala para η_c refere-se apenas a contaminantes sólidos típicos. Contaminantes como água ou outros fluidos prejudiciais à vida do rolamento não está incluída. Devido ao desgaste abrasivo em ambientes altamente contaminados ($\eta_c = 0$), a vida útil de um rolamento pode ser significativamente mais curta que a vida nominal.

Fator a_{SKF} para rolamentos de esferas radiais



$$a_{skf} = a_{23} = 3,5$$

Se $\kappa > 4$, utilize a curva para $\kappa = 4$.

Conforme o valor de $\eta_c \cdot (P_u/P)$ tender a zero, a_{SKF} tende a 0,1 para todos os valores de κ .

Vida em milhões de ciclos (L):
$$L = a_1 \cdot a_{23} \cdot \left(\frac{C}{P}\right)^p = 0,64 \cdot 3,5 \cdot \left(\frac{65000}{9700}\right)^3 = 674,02$$

Vida em horas (L_h):
$$L_h = \frac{10^6}{60 \cdot n} \cdot L = \frac{10^6}{60 \cdot 540} \cdot 674,02 = \mathbf{20803 \text{ h}}$$

Vida requerida em horas (enunciado) : 10.000 h

Rolamento adequado!

Lubrificação a óleo: ISO VG150

Se adotarmos **ISO VG100**, viscosidade = 23 mm²/s
$$k = \frac{\vartheta}{\vartheta_1} = \frac{23}{25} = \mathbf{0,92} \quad a_{skf} = a_{23} = 1,8$$

Vida em milhões de ciclos (L):
$$L = a_1 \cdot a_{23} \cdot \left(\frac{C}{P}\right)^p = 0,64 \cdot 1,8 \cdot \left(\frac{65000}{9700}\right)^3 = 346,63$$

Vida em horas (L_h):
$$L_h = \frac{10^6}{60 \cdot n} \cdot L = \frac{10^6}{60 \cdot 540} \cdot 346,63 = \mathbf{10698 \text{ h}}$$
 Rolamento adequado!

Lubrificação a óleo: ISO VG100

3. Escolher o óleo e método de lubrificação

Lubrificação: óleo / graxa ? (pg.239, catálogo) **Lubrificação a óleo: ISO VG100**

Métodos de lubrificação: pg.262, catálogo

- Banho de óleo;
- Anel de coleta de óleo;
- Óleo circulante;
- Jato de óleo;
- Ar-óleo;
- Vapor de óleo.

Escolher em função do projeto !!

4. Verificar rotação ($n_{\text{máx}}$)

A velocidade de referência ajustada para lubrificação com óleo pode ser estimada usando-se a equação (diagrama 2, pg.121), Na qual são utilizados os seguintes parâmetros:

η_{ar} : velocidade de referência ajustada (rpm);

η_r : velocidade de referência nominal (rpm) (catálogo);

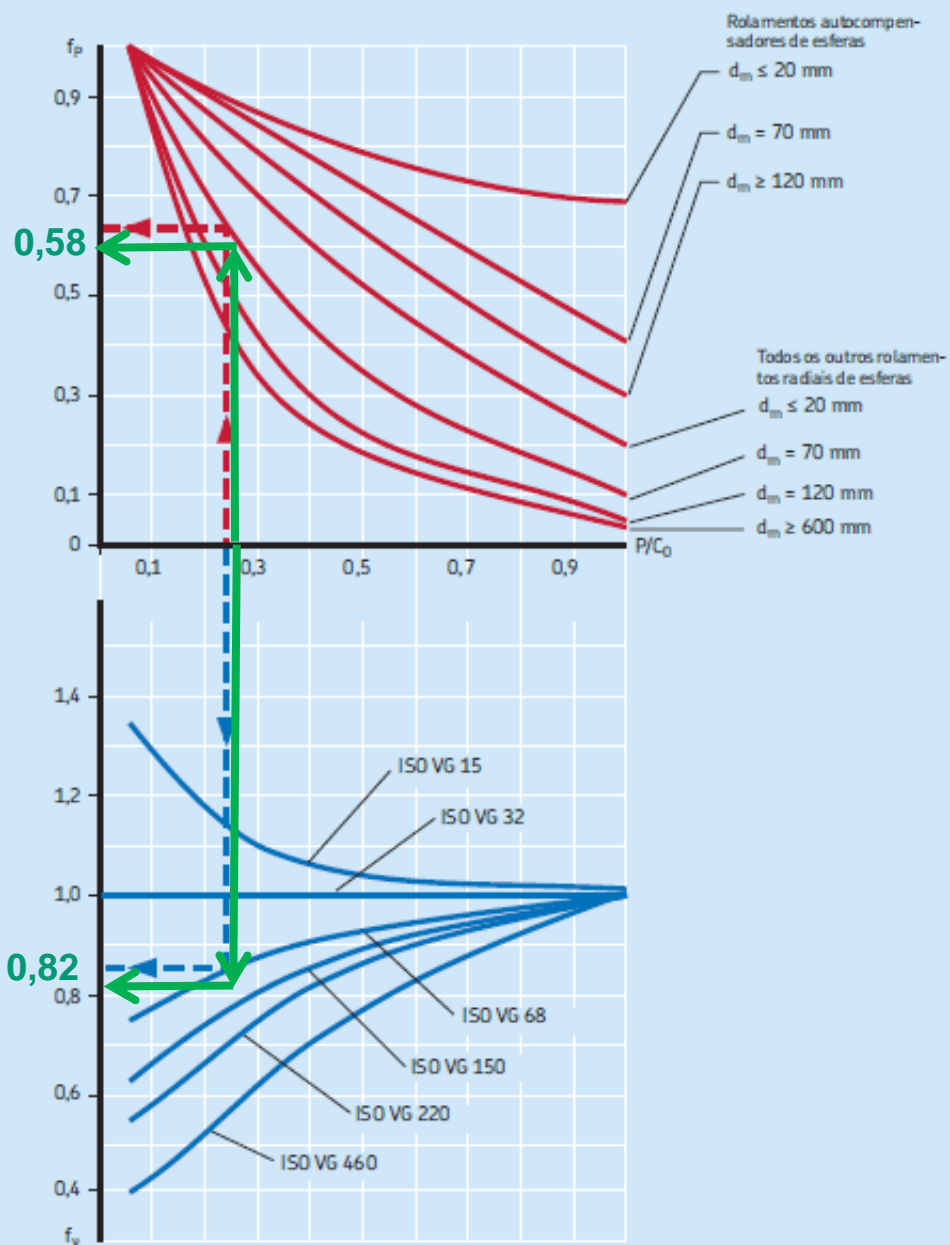
f_p : fator de ajuste para carga do rolamento (P);

f_v : fator de ajuste para viscosidade do óleo.

$$\eta_{ar} = \eta_r \cdot f_p \cdot f_v$$

Os valores dos eixos das abscissas é obtido pela relação:

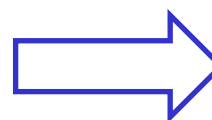
$$\frac{P}{C_0} = \frac{9700}{38000} = 0,255$$



Diâmetro médio: $d_m = 80$ mm

Lubrificação a óleo: ISO VG100

$$\frac{P}{C_0} = 0,255$$



$$f_p = 0,58$$

$$f_v = 0,82$$

$$\eta_{ar} = \eta_r \cdot f_p \cdot f_v = 13000 \cdot 0,58 \cdot 0,82 = \mathbf{6182 \text{ rpm}} < n_{lim} = 8500 \text{ rpm} \quad \mathbf{Ok!}$$

Portanto a velocidade de referência ajustada (6182 rpm) é menor que a velocidade limite do rolamento (8500 rpm, dada no catálogo), além disso a máxima velocidade de utilização dos rolamentos (630 rpm) é menor que a velocidade de referência ajustada (6182 rpm) !

5. Calcular momento de atrito

Sob certas condições, o momento de atrito pode ser estimado com precisão suficiente, usando-se o coeficiente constante de atrito μ . As condições são:

- carga do rolamento $P \approx 0,1 C$;
- boa lubrificação ;
- condições operacionais normais

O momento de atrito sob essas condições pode ser estimado por:

$$M = 0,5 \cdot \mu \cdot P \cdot d$$

Sendo:

M = momento de atrito [N.mm]

P = carga dinâmica equivalente do rolamento [N]

d = diâmetro do furo do rolamento [mm]

μ = coeficiente constante de atrito para o rolamento

O coeficiente de atrito é obtido pela tabela 1, pg.98, para rolamentos de esferas

n_{ar} : velocidade de referência ajustada (rpm);

n : velocidade de referência nominal (rpm) (catálogo);

Tabela 1

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

Tipo de rolamento	Coeficiente 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
--	--------

Rolamentos axiais de rolos de agulhas	0,0050
---------------------------------------	--------

Rolamentos axiais autocompensadores de rolos	0,0018
--	--------

$$M = 0,5 \cdot \mu \cdot P \cdot d = 0,5 \cdot 0,0015 \cdot 9700 \cdot 50$$

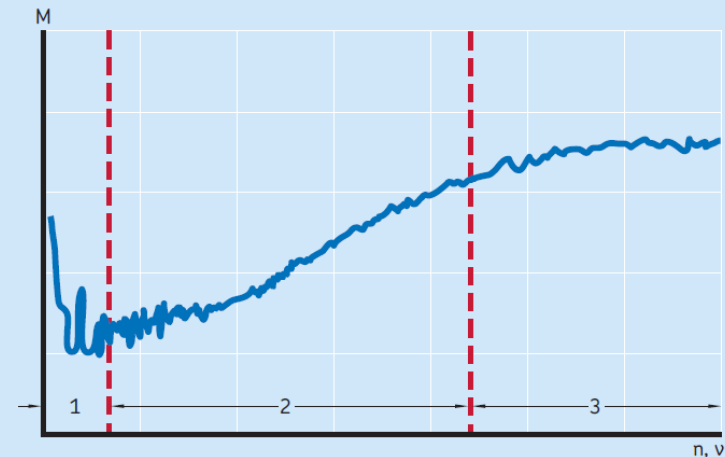
$$M = 363,75 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Importância: conhecer tipo de lubrificação no rolamento quando em serviço.

Maiores detalhes no catálogo, pg.98

Diagrama 1

Momento de atrito do rolamento como uma função da velocidade ou da viscosidade



Zona 1: Lubrificação mista
 Zona 2: Lubrificação elastohidrodinâmica (EHL)
 Zona 3: EHL + efeitos térmico e de esgotamento

Resolução:

Dimensionar os rolamentos, o que significa ?

1. Dimensionamento estático;
2. Dimensionamento dinâmico;
3. Escolher o óleo e método de lubrificação;
4. Verificar rotação ($n_{\text{máx}}$);
5. Calcular momento de atrito;
6. Escolher vedadores (pg.226);
7. Fazer desenho ilustrativo de montagem no eixo .

Problema extra : recalcular para uma vida de 30.000h.

2. Cálculo dinâmico indireto (para facilitar a escolha)

Vida em milhões de ciclos (L):
$$L = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot \left(\frac{C}{P}\right)^p \rightarrow a_1 \cdot a_{23} \cdot \left(\frac{C}{P}\right)^p \rightarrow a_1 \cdot a_{skf} \cdot \left(\frac{C}{P}\right)^p$$

Vida em horas (L_h):

$$L_h = \frac{10^6}{60 \cdot n} \cdot L$$

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

Vida requerida em horas (enunciado) : 30.000 h

$$30000 = \frac{10^6}{60 \cdot 540} \cdot L \rightarrow L = 972$$

Considerações:

$$a_1 = 0,64 \text{ (confiabilidade)}$$

$$a_{skf} = 1,0 \text{ (aproximação)}$$

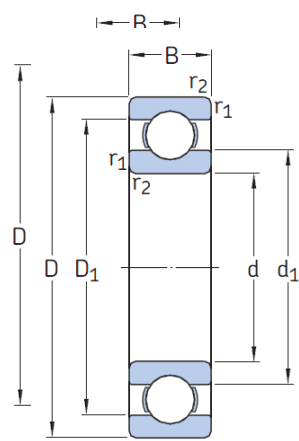
$$P = P_r \text{ (no mínimo)} = 7574 \text{ N (aproximação)}$$

$$972 = 0,64 \cdot 1,0 \cdot \left(\frac{C}{7574}\right)^3 \rightarrow C = 181095 \text{ N}$$



Tabela de rolamentos!

Dimensões principais			Classificações básicas de carga		Limite de carga de fadiga P_u	Classificações de velocidade		Massa kg	Designação
d	D	B	dinâmica C	estática C_0		Velocidade de referência	Velocidade-limite		
mm			kN		kN	r/min			-
50	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
	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	

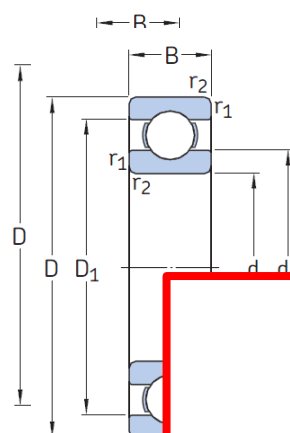


Dimensões				Dimensões de encosto e raio					
d	d_1	D_1	D_2	$r_{1,2}$ min.	d_a min.	D_a máx.	r_a máx.		
mm				mm					
50	55,1	59,9	-	0,3	52	63	0,3	0,015	17
	56,9	65,1	-	0,6	53,2	68,8	0,6	0,02	16
	60	70	-	0,6	53,2	76,8	0,6	0,02	14
	59,7	70,3	72,8	1	54,6	75,4	1	0,025	15
	62,5	77,4	81,7	1,1	57	83	1	0,025	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



Dimensões principais			Classificações básicas de carga		Limite de carga de fadiga	Classificações de velocidade		Massa	Designação
d	D	B	dinâmica C	estática C ₀	P _u	Velocidade de referência	Velocidade-limite		

mm			kN	kN	kN	r/min		kg	-
50	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



**Alterar tipo de rolamento:
contato angular, rolos, rolos cônicos,
autocompensadores,....**



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