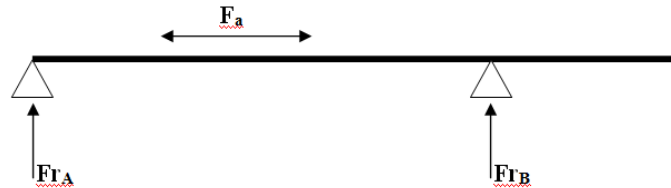


Exercício – Parte 2 (recálculo para 30.000h)

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 : **30.000** 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 %.

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)

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:

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

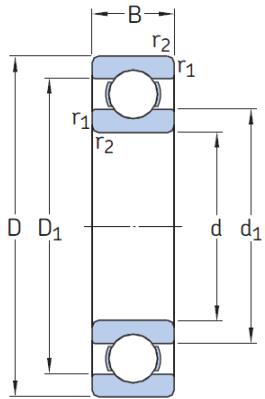
$$a_{skf} = 1,5 \text{ (aproximação)}$$

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

$$972 = 0,64 \cdot 1,5 \cdot \left(\frac{C}{7574}\right)^3 \rightarrow C = 76054 \text{ N}$$

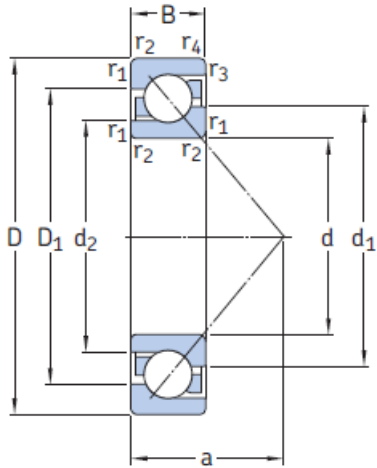


Tabela de rolamentos!



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

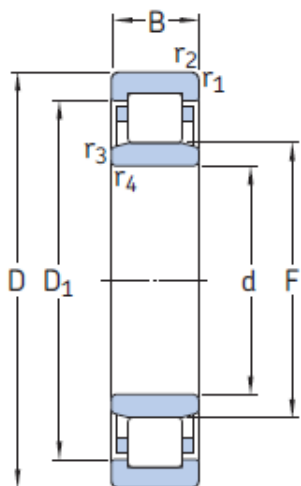
Rolamento de uma carreira de esferas: **SKF 6410** → **Verificar!**



Dimensões principais			Classificações básicas de carga		Limite de carga de fadiga P_u	Classificações de velocidade		Massa	Designações ¹⁾ Rolamento de pareamento universal
d	D	B	dinâmica C	estática C_0		Velocidade de referência	Velocidade-limite		
mm			kN		kN	r/min		kg	-
50	90	20	40	31	1,32	9 000	9 000	0,47	* 7210 BECBPH
	90	20	40	31	1,32	9 000	9 000	0,47	* 7210 BECBM
	90	20	40	31	1,32	9 000	9 000	0,47	* 7210 BECBP
	90	20	37,7	28,5	1,22	8 500	8 500	0,47	7210 BECBY
	110	27	75	51	2,16	8 000	8 000	1,1	* 7310 BECBM
	110	27	75	51	2,16	8 000	8 000	1,1	* 7310 BECBP
	110	27	74,1	51	2,2	7 500	7 500	1,15	7310 BECBY
	110	27	68,9	47,5	2	7 500	7 500	1,1	-
	110	27	75	51	2,16	8 000	8 000	1,1	* 7310 BEGAPH

Rolamento de esferas de contato angular: **SKF 7310 BEGAPH** → Verificar!

Para exemplificar o dimensionamento de um rolamento de rolos, escolher-se-á um rolamento de uma carreira de rolos cilíndricos!



Dimensões principais			Classificações básicas de carga		Limite de carga de fadiga	Classificações de velocidade		Massa	Designações Rolamento com gaiola padrão	Gaiola padrão alternativa ¹⁾
d	D	B	C	C ₀	P _u	Velocidade de referência	Velocidade limite	kg	-	-
mm			kN		kN	r/min		kg	-	-
50 cont.	90	23	90	88	11,4	8 500	9 000	0,56	* NU 2210 ECP	J, M, ML, PH
	90	23	90	88	11,4	8 500	9 000	0,57	* NJ 2210 ECP	J, M, ML, PH
	90	23	90	88	11,4	8 500	9 000	0,59	* NUP 2210 ECP	J, M, ML, PH
	110	27	127	112	15	6 700	8 000	1,15	* NU 310 ECP	J, M, ML, PH
	110	27	127	112	15	6 700	8 000	1,15	* NJ 310 ECP	J, M, ML, PH
	110	27	127	112	15	6 700	8 000	1,15	* NUP 310 ECP	J, M, ML, PH
	110	27	127	112	15	6 700	8 000	1,15	* N 310 ECP	-
	110	40	186	186	24,5	6 700	8 000	1,75	* NU 2310 ECP	J, ML, PH
	110	40	186	186	24,5	6 700	8 000	1,75	* NJ 2310 ECP	J, ML, PH
	110	40	186	186	24,5	6 700	8 000	1,75	* NUP 2310 ECP	J, ML, PH

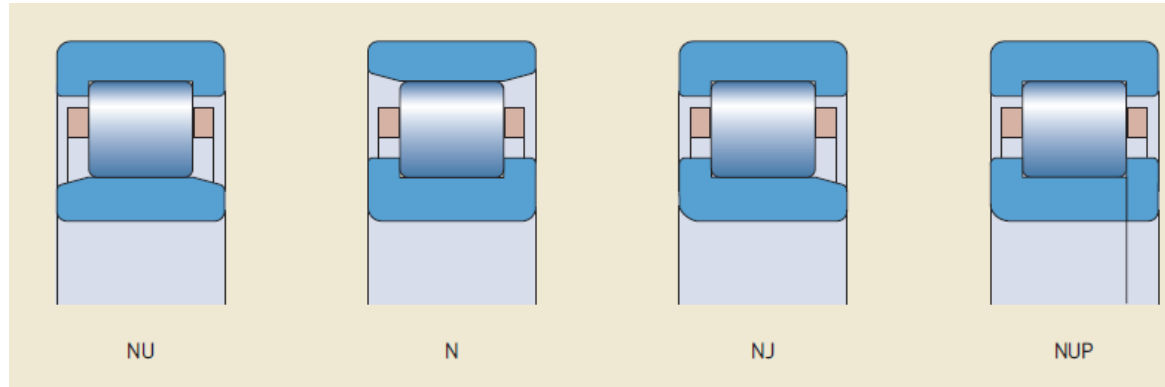
pg.612

Dimensões			Dimensões de encosto e raio							Fator de cálculo	Anel de encosto		Dimensões				
d	d ₁	D ₁	F, E	r _{1,2} min.	r _{3,4} min.	s ¹⁾	d _a min.	d _a máx.	d _b , D _a min.	D _a máx.	r _a máx.	r _b máx.	k _r	Designação	Massa	B ₁	B ₂
mm			mm							-	-	kg	mm				
50 cont.	-	78	59,5	1,1	1,1	1,5	57	57,5	61	82,4	1	1	0,2	-	-	-	-
	64	78	59,5	1,1	1,1	1,5	57	57,5	66	82,4	1	1	0,2	-	-	-	-
	64	78	59,5	1,1	1,1	-	57	-	66	82,4	1	1	0,2	-	-	-	-
	71,2	92,1	65	2	2	1,9	60	63	67	99,6	2	2	0,15	HJ 310 EC	0,15	8	13
	71,2	92,1	65	2	2	1,9	60	63	73	99,6	2	2	0,15	HJ 310 EC	0,15	8	13
	71,2	92,1	65	2	2	-	60	-	73	99,6	2	2	0,15	-	-	-	-
	71,2	-	97	2	2	1,9	60	95	99	101	2	2	0,12	-	-	-	-
	-	92,1	65	2	2	3,4	60	63	67	99,6	2	2	0,25	-	-	-	-
	71,2	92,1	65	2	2	3,4	60	63	73	99,6	2	2	0,25	-	-	-	-
	71,2	92,1	65	2	2	-	60	-	73	99,6	2	2	0,25	-	-	-	-

a. Cálculo da carga estática equivalente

Rolamento de uma carreira de rolos cilíndricos: **NU2210 ECP**

pg.570



Modelo NU

Os rolamentos modelo NU apresentam dois flanges integrados no anel externo e nenhum flange no anel interno. Esses rolamentos podem suportar o deslocamento axial do eixo em relação ao mancal em ambas as direções. (pg.570)

Modelo ECP

EC: Projeto interno otimizado que contém rolos maiores e/ou em maior quantidade e com contato modificado entre o flange e a extremidade do rolo;

P: Gaiola PA66 reforçada com fibra de vidro, centrada nos rolos. (pg.602)

características: $d = 50 \text{ mm}$; $D = 90 \text{ mm}$; $C = 90000$; $C_0 = 88000 \text{ N}$;
 Carga de Fadiga: $P_u = 11400 \text{ N}$
 Velocidades: referência: 8500 rpm ; limite: 9000 rpm ; $K_r = 0,2$

Carga estática equivalente no rolamento (pg. 594):

$$P_0 = F_r$$

Neste caso: $P_0 = 7574 \text{ N}$

Capacidade de carga estática C_0 : $C_0 \geq s_0 P_0 = 1. 7574 = 7574 \text{ N}$

b. Cálculo da carga dinâmica equivalente (pg. 594)

Rolamentos livres

$$P = F_r$$

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

Rolamentos fixos

Tabela 7

Fatores de cálculo para rolamentos de rolos cilíndricos

Séries de dimensões de rolamento	Valor limite e	Fator de carga axial Y
10, 18, 2, 3, 4	0,2	0,6
22, 23, 28, 29, 30	0,3	0,4

pg.593

$$F_a / F_r \leq e$$

$$\rightarrow P = F_r$$

$$F_a / F_r \leq 0,3$$

$$\rightarrow P = F_r$$

$$F_a / F_r \leq e$$

$$\rightarrow P = F_r$$

$$F_a / F_r \leq 0,15$$

$$\rightarrow P = F_r$$

$$F_a / F_r > e$$

$$\rightarrow P = 0,92 F_r + Y F_a$$

$$F_a / F_r > 0,3$$

$$\rightarrow P = 0,92 F_r + 0,4 F_a$$

$$F_a / F_r > e$$

$$\rightarrow P = 0,92 F_r + Y F_a$$

$$F_a / F_r > 0,15$$

$$\rightarrow P = 0,92 F_r + 0,4 F_a$$

F_a não deve exceder $0,5 F_r$

F_a não deve exceder $0,5 F_r$

F_a não deve exceder $0,5 F_r$

F_a não deve exceder $0,25 F_r$

$$P = 0,92.7574 + 0,4.3764 = \mathbf{8474 \text{ N}}$$

c. Carga máxima axial (pg.596)

Por se tratar de rolamentos de rolos cilíndricos, deve-se verificar a carga axial máxima (limitação nos flanges internos), depende do lubrificante, temperatura e dissipação de calor.

Superfície de diâmetro externo e do furo $\pi B (D + d) \leq 50\,000 \text{ mm}^2$

$$F_{ap} = \frac{k_1 C_0 10^4}{n (d + D)} - k_2 F_r$$

Superfície de diâmetro externo e do furo $\pi B (D + d) > 50\,000 \text{ mm}^2$

$$F_{ap} = \frac{7,5 k_1 C_0^{2/3} 10^4}{n (d + D)} - k_2 F_r$$

Aplicações de óleo circulante

$$F_{ap\,oil} = F_{ap} + \frac{1,5 \times 10^4 k_1 \Delta T_s V'_s}{n (d + D)}$$

Para evitar riscos de fratura no flange, a carga axial de atuação contínua máxima é limitada:

Rolamentos da série 2..

$$\rightarrow F_{ap\,max} \leq 0,0045 D^{1,5}$$

Rolamentos de outras séries

$$\rightarrow F_{ap\,max} \leq 0,0023 D^{1,7}$$

Rolamentos de alta capacidade

$$\rightarrow F_{ap\,max} \leq 0,0035 D^{1,7}$$

$$S = \pi \cdot B \cdot (D + d) = \pi \cdot 23 \cdot (90 + 50) = 10115 \text{ mm}^2$$

$$F_{ap} = \frac{k_1 \cdot C_0 \cdot 10^4}{n \cdot (d + D)} - k_2 \cdot F_r$$

$$F_{ap} = \frac{k_1 \cdot C_0 \cdot 10^4}{n \cdot (d + D)} - k_2 \cdot F_r$$

$$F_{ap \max} \leq 0,0045 \cdot D^{1,5}$$

Tabela 8

Fatores de lubrificação para rolamentos de rolos cilíndricos

Tipos de rolamento

Fatores de lubrificação

 Lubrificação a óleo
 k_1 k_2

 Lubrificação a graxa
 k_1 k_2

 Rolamentos de uma carreira de rolos cilíndricos
 e rolamentos de rolos cilíndricos de alta capacidade

1,5 0,15

1 0,1

Rolamentos de rolos cilíndricos de uma carreira com número máximo de rolos

1 0,3

0,5 0,15

Rolamentos de rolos cilíndricos de duas carreiras com número máximo de rolos

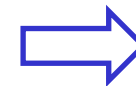
0,35 0,1

0,2 0,06

pg.598

$$F_{ap} = \frac{k_1 \cdot C_0 \cdot 10^4}{n \cdot (d + D)} - k_2 \cdot F_r = \frac{1,5 \cdot 88 \cdot 10^4}{540 \cdot (50 + 90)} - 0,15 \cdot 7,574 = 16,32 \text{ kN}$$

$$F_{ap \max} = 0,0045 \cdot D^{1,5} = 0,0045 \cdot 90^{1,5} = 3,84 \text{ kN} < F_{ap}$$



Ok!

d. 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):

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

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

d1. 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

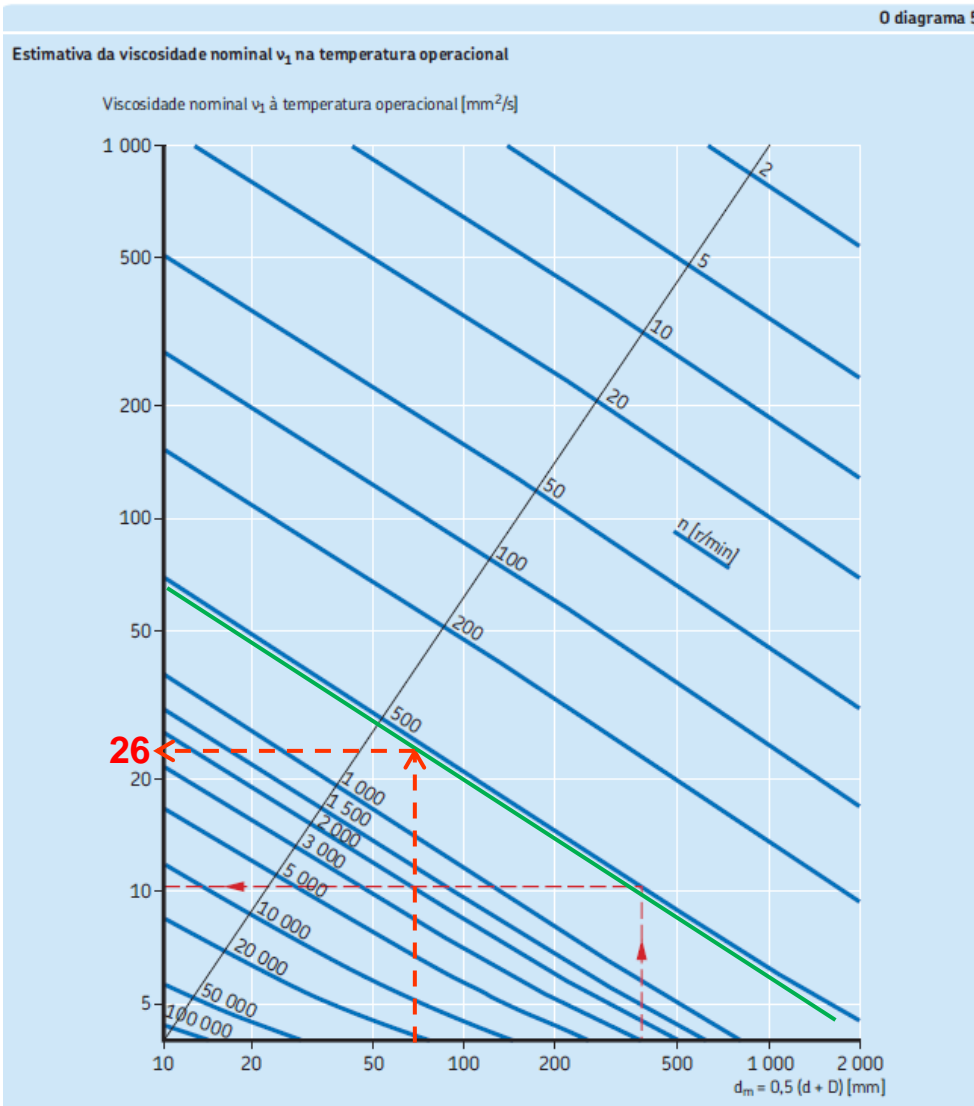
Confiabilidade	Probabilidade de falha	Vida nominal SKF	Fator
	n	L_{nm}	a_1
%	%	milhões de revoluções	–
90	10	L_{10m}	1
95	5	L_{5m}	0,64
96	4	L_{4m}	0,55
97	3	L_{3m}	0,47
98	2	L_{2m}	0,37
99	1	L_{1m}	0,25

d2. 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. 67 (rolos)

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



Diâmetro médio do rolamento (d_m):

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

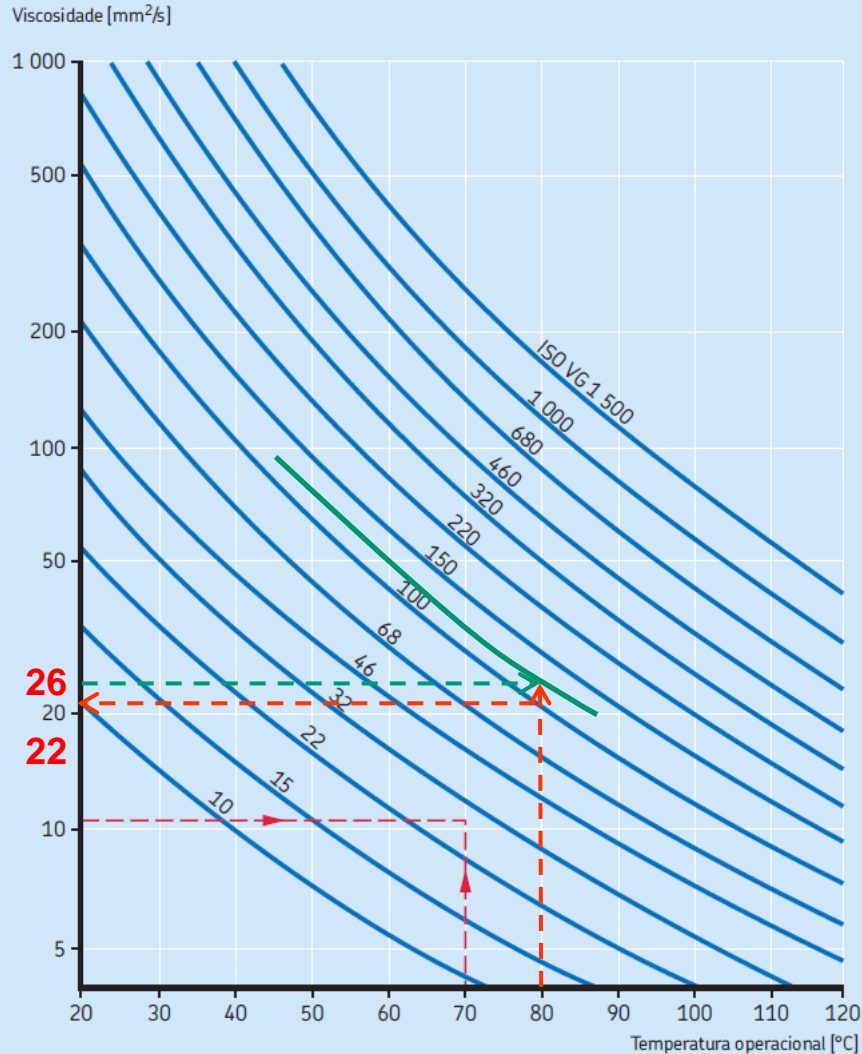
$$d_m = 0,5 \cdot (50 + 90) = 70 \text{ mm}$$

rotação (n): 540 rpm

Viscosidade = 26 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 = 26 mm²/s

Óleo escolhido: **ISO VG100**, cuja viscosidade a 80° C é 22 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 = 26 mm²/s (ν_1)

$$k = \frac{\vartheta}{\vartheta_1} = \frac{22}{26} = \mathbf{0,84}$$

ν = viscos. óleo escolhido: **ISO VG100**, viscosidade = 22 mm²/s

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

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

P_u : carga limite de fadiga (tabela de rolamentos)

$$\eta_c \cdot \frac{P_u}{P} = 0,55 \cdot \frac{11400}{8474} = \mathbf{0,74}$$

P ; carga dinâmica equivalente

Tabela 4

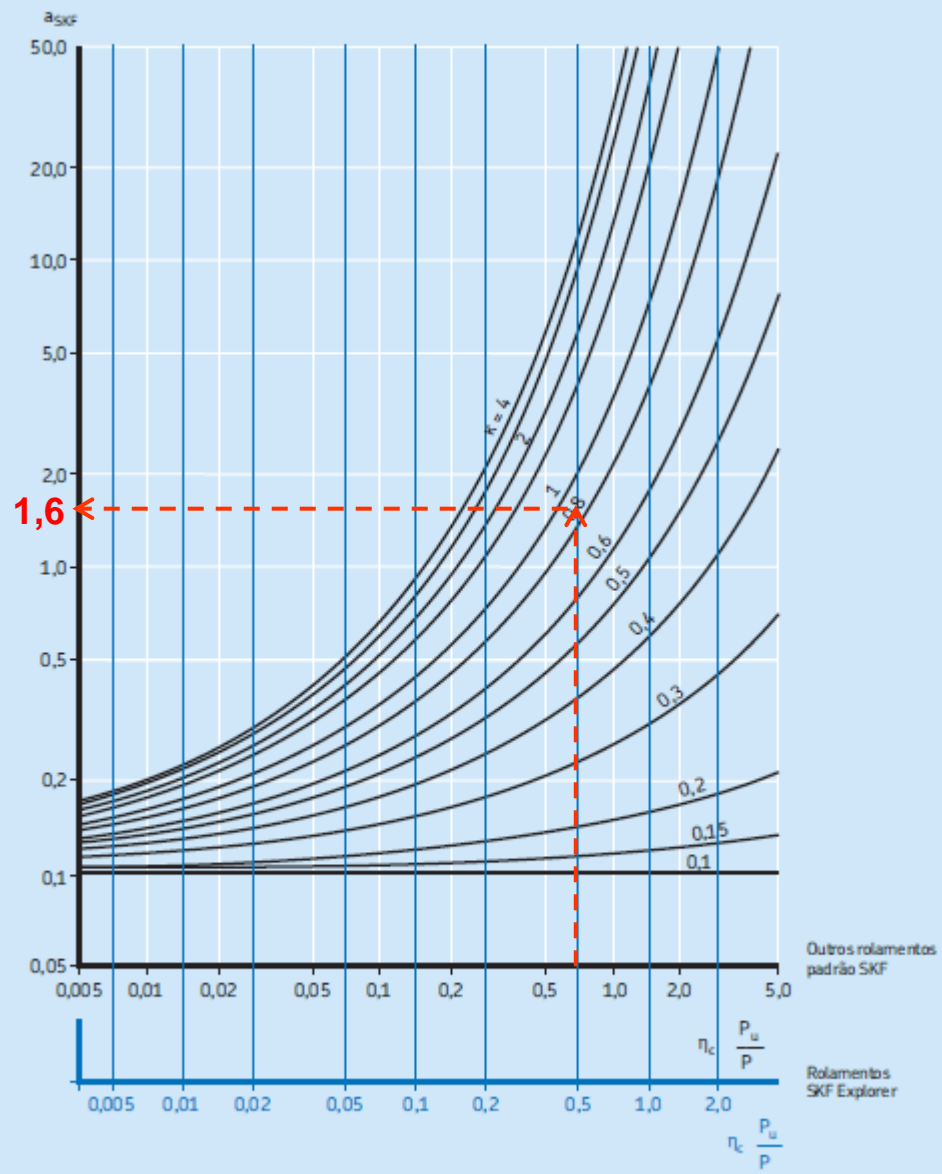
 Valores de referência para o fator η_c para diferentes níveis de contaminação

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 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 rolos radiais

dimensionamento de mancais de rolamentos



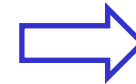
$$a_{skf} = a_{23} = 1,6$$

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

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

Vida em milhões de ciclos (L):
$$L = a_1 \cdot a_{23} \cdot \left(\frac{C}{P}\right)^p = 0,64 \cdot 1,6 \cdot \left(\frac{90000}{8474}\right)^{10/3} = 2696,58$$

Vida em horas (L_h):
$$L_h = \frac{10^6}{60 \cdot n} \cdot L = \frac{10^6}{60 \cdot 540} \cdot 2696,58 = 83227 \text{ h}$$



Ok!

Vida requerida em horas (enunciado) : **30.000 h**

OBS: rolamento muito acima do desejado, o que já era esperado, pois rolamentos de esferas já indicavam que seriam satisfatórios!



Recalcular !!