

14

RODAMIENTOS

1. INTRODUCCIÓN

Los rodamientos, también denominados cojinetes de rodadura, sirven de punto de apoyo a ejes u otros elementos giratorios. Las cargas que llegan a dichos apoyos se transmiten a la estructura de soporte a través de los anillos y los elementos rodantes de los rodamientos. Estos elementos rodantes pueden ser bolas o rodillos. Los rodamientos de bolas se utilizan, como regla general, en aplicaciones de grandes velocidades de giro del eje: las bolas tienen un contacto puntual con las pistas de los anillos y por tanto menos resistencia a la rodadura que los rodillos, esto implica una menor fricción y por ello una menor generación de calor al girar, pudiendo en consecuencia girar a altas velocidades sin llegar a sobrecalentarse; como contrapartida, el contacto puntual conlleva una menor capacidad de carga porque se desarrollan unas presiones de contacto mayores. Los rodamientos de rodillos se utilizan, como regla general, en aplicaciones donde el rodamiento esté sometido a cargas altas: al tener una mayor superficie de contacto que los rodamientos de bola, tienen una mayor capacidad de carga pero como contrapartida se genera más calor, por lo que la velocidad de giro recomendable es menor.

Los rodamientos están estandarizados, de manera que se seleccionan de catálogos de fabricantes. A la hora de seleccionar un rodamiento, los requisitos funcionales básicos que debe cumplir el rodamiento son dos: por un lado, el rodamiento debe encajar en un espacio determinado; por otro lado, debe ser capaz de soportar las cargas a las que está sometido

con una duración y fiabilidad mínimas. Además, un rodamiento sufrirá durante su vida de funcionamiento impactos, aceleraciones, vibraciones, condiciones ambientales adversas de corrosión, suciedad, humedad, temperatura...

Un rodamiento está formado por cuatro componentes (ver Figura 1): el anillo interior, el anillo exterior, los elementos rodantes y la jaula o separador (éste último no imprescindible). En ocasiones se coloca además una especie de anillo de sellado (“seal ring”) que tapa los elementos rodantes evitando la entrada de suciedad que pueda acortar la vida del rodamiento.

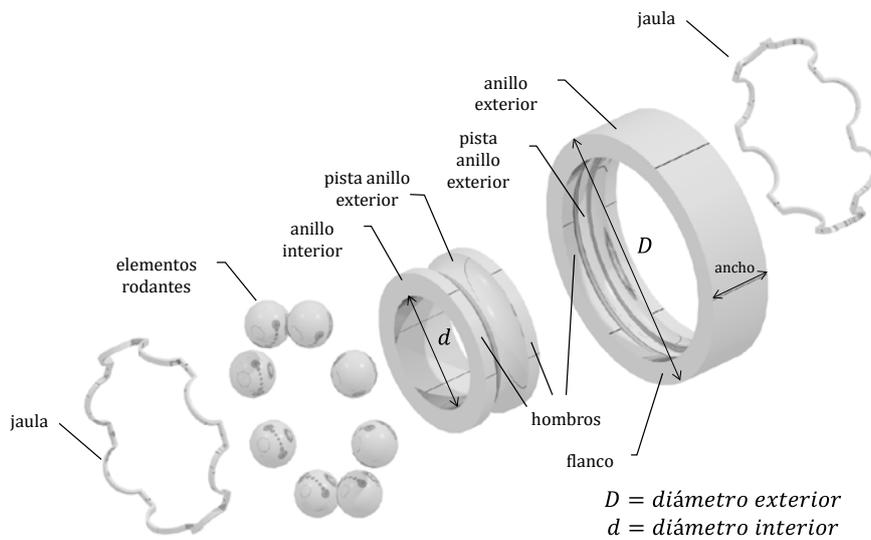


Figura 1. Componentes de un rodamiento.

Existe una enorme variedad de tipos de rodamiento en el mercado: en la Figura 2 se muestran algunos de los más comunes. Para conocer las características particulares de cada tipo de rodamiento, lo más conveniente es consultar los catálogos de fabricantes (ver a modo ilustrativo la Figura 3).

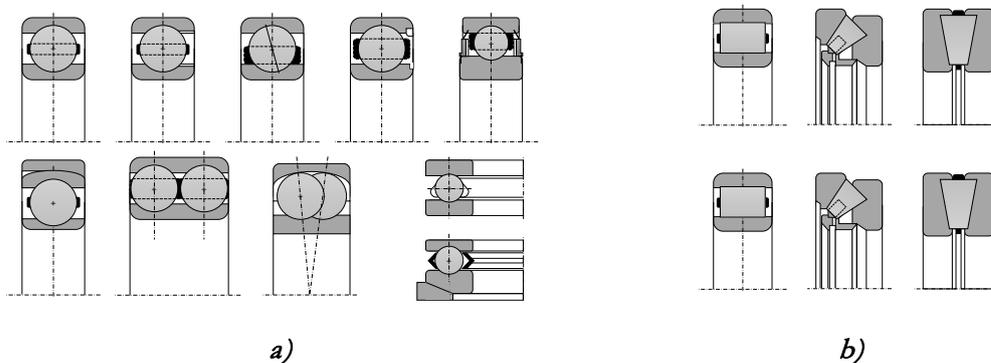


Figura 2. Algunos tipos de rodamiento: a) de bolas b) de rodillos.

Tipos de rodamientos												Características				
Rodamientos rígidos de bolas	Rodamientos de bolas de contacto angular	Rodamientos de doble hilera de bolas de contacto angular	Rodamientos de bolas de contacto angular apareados	Rodamientos autoalineables de bolas	Rodamientos cilíndricos	Rodamientos cilíndricos de una sola pestaña	Rodamientos cilíndricos de doble pestaña	Rodamientos de doble hilera de rodillos cilíndricos	Rodamientos de agujas	Rodamientos de rodillos cónicos	Rodamientos de 2 y 4 hileras de rodillos cónicos	Rodamientos de rodillos esféricos	Rodamientos axiales de bolas de contacto angular	Rodamientos axiales de rodillos cilíndricos	Rodamientos axiales de rodillos esféricos	Capacidad de manejo de carga (← axial, ↑ radial)
****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	Alta velocidad (1)
****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	Alta precisión rotacional (1)
****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	Bajo ruido / vibración (1)
****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	Bajo par de fricción (1)
****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	Alta rigidez (1)
****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	Resistencia a choques / vibración (1)
****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	Desalineamiento permitido por los anillos int./ext. (1)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Fijo en la dirección axial (2)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Móvil en la dirección axial (3)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Anillos interior/ exterior separables (4)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Dímetro interior cónico en el anillo (5)

Figura 3. Propiedades principales de algunos tipos de rodamiento.

Mikel Abasolo, Santiago Navalpuro, Edurne Iriondo y Javier Corral



2. VIDA DE LOS RODAMIENTOS

Al rodar los elementos rodantes sobre las pistas de los anillos del rodamiento, introducen cargas variables en el rodamiento, con lo que el fallo se producirá por fatiga. Se considera que el rodamiento falla por fatiga cuando aparecen en él los primeros síntomas de fatiga, y no cuando se da el fallo catastrófico. Por ejemplo, para el fabricante Timken el fallo por fatiga ocurre cuando existe un “picado de las pistas de 0,01 pulgadas cuadradas”. Cuando sucede esto, el rodamiento vibra y/o hace ruido; pese a que el rodamiento pueda seguir funcionando más allá de este punto, se considera que se ha dado el fallo por fatiga porque las condiciones de funcionamiento han dejado de ser óptimas.

La vida de un rodamiento se cuantifica como el número de revoluciones completadas por el anillo interior (con el anillo exterior fijo) hasta que aparecen estos primeros síntomas de fatiga. Debido a la alta dispersión propia del fenómeno de la fatiga, no es suficiente con ensayar un único rodamiento, sino que se ensaya un grupo de ellos. Así, se define la “Vida nominal (L_{10})” como el número de revoluciones que completa el anillo interior (anillo exterior fijo) sin que aparezcan los primeros síntomas de fatiga en el 90% de un grupo de rodamientos iguales (es decir FIABILIDAD DEL 90%, $R=0.9$). También se define la “Vida mediana (L_{50})” como el número de revoluciones del anillo interior (anillo exterior fijo) sin que aparezcan los primeros síntomas de fatiga en el 50% de un grupo de rodamientos iguales (FIABILIDAD R DEL 50%, $R=0.5$). Habitualmente se utiliza la vida nominal L_{10} en detrimento de la vida mediana L_{50} , y su valor se cuantifica en millones de revoluciones.

La Figura 4 muestra un gráfico donde se relacionan las vidas o duraciones (L) correspondientes a distintas fiabilidades (R). De acuerdo a la figura (obtenida mediante ensayos), la duración L correspondiente a cualquier fiabilidad R se puede relacionar con la duración L_{10} correspondiente a la fiabilidad $R=0,9$ mediante la siguiente expresión para rodamientos de bolas y de rodillos cilíndricos:

$$L_{10} = \frac{L}{0,02 + 4,439 \cdot \left[\ln \left(\frac{1}{R} \right) \right]^{\frac{1}{1,483}}} \quad (1)$$

Y para rodamientos de rodillos cónicos:

$$L_{10} = \frac{L}{4,48 \cdot \left[\ln \left(\frac{1}{R} \right) \right]^{\frac{1}{1,5}}} \quad (2)$$

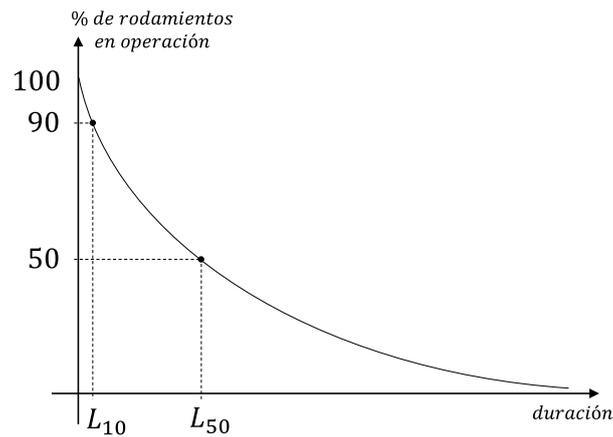


Figura 4. Propiedades principales de algunos tipos de rodamiento.

Las condiciones de lubricación, el límite de fatiga del material, el tipo de rodamiento, las condiciones ambientales, etcétera influyen decisivamente en la duración del rodamiento. En este sentido, los catálogos de fabricantes proporcionan factores que modifican el valor de L_{10} para tener en cuenta el efecto de todos estos fenómenos. En este libro no se hará uso de estos factores ya que no son generalistas, cada fabricante tiene los suyos aplicables a sus productos particulares.

Para que aparezcan los primeros síntomas de fatiga, lógicamente el rodamiento tiene que estar sometido a carga. Evidentemente, la vida nominal L_{10} es diferente según el valor de carga aplicada; a mayor carga aplicada F , menor es L_{10} . Representando la duración L_{10} en función de la carga F en una gráfica logarítmica (ver Figura 5), los puntos de fallo (obtenidos de ensayos) se aproximan a una recta que responde a la ecuación:

$$F \cdot (L_{10})^{1/a} = cte \quad (3)$$

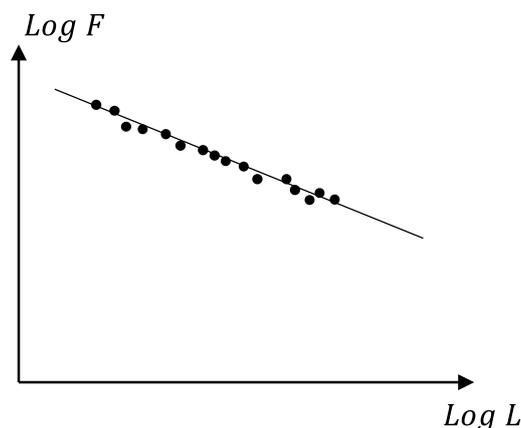


Figura 5. Relación carga aplicada F -vida nominal L_{10} (escala logarítmica).

Siendo $a=3$ para rodamientos de bolas y $a=10/3$ para rodamientos de rodillos.

Se define como capacidad dinámica de carga C el valor de carga F correspondiente a un

determinado valor de duración L_{10} , habitualmente igual a 1 millón de revoluciones. En cualquier caso, el fabricante debe indicar claramente a qué valor de L_{10} corresponde la capacidad C que aparece en su catálogo. En el caso de $L=1$ millón de revoluciones, C se calcularía como:

$$F \cdot (L_{10})^{1/a} = cte \rightarrow C \cdot 1^{1/a} = C = F \cdot (L_{10})^{1/a} \quad (4)$$

Este valor de C es con el que se entra al catálogo y se selecciona el rodamiento adecuado. La forma de proceder es como se explica a continuación. Supóngase que se quiere seleccionar un rodamiento que deba soportar una carga F durante L millones de revoluciones con una determinada fiabilidad R : en primer lugar, se obtiene la duración L_{10} a partir de la duración L correspondiente a la fiabilidad R con la ecuación (1) o (2); en segundo lugar, se calcula la capacidad C con la fórmula (4); finalmente, se selecciona del catálogo un rodamiento de capacidad C igual o superior al valor calculado.

Habitualmente, la carga F que debe soportar el rodamiento a lo largo de su vida de funcionamiento suele mayorarse por un factor de mayoración de carga, en función del tipo de aplicación al cual se va a destinar el rodamiento. La tabla 1 indica valores típicos.

TIPO DE APLICACIÓN	FACTOR DE MAYORACIÓN DE CARGA
Engranajes de precisión	1,0-1,1
Engranajes comerciales	1,1-1,3
Aplicación con sellado de rodamiento pobre	1,2
Maquinaria sin impactos	1,0-1,2
Maquinaria con impactos leves	1,2-1,5
Maquinaria con impactos moderados	1,5-3,0

Tabla 1. Valores recomendados del factor de mayoración de F para el cálculo de C .

En cuanto a la duración L_{10} , a falta de datos sobre la duración requerida, los fabricantes también suelen proporcionar tablas orientativas como la de la Tabla 2 con valores recomendados.

APLICACIÓN	DURACIÓN L_{10} RECOMENDADA (horas)
Electrodomésticos	1000-2000
Motores de aviación	1000-4000
Automóviles	1500-5000
Equipos agrícolas	3000-6000
Elevadores, ventiladores industriales, transmisiones de usos múltiples	8000-15000
Motores eléctricos, máquinas industriales en general	20000-30000
Bombas y compresores	40000-60000
Equipos críticos en funcionamiento durante 24h/día	100000-200000

Tabla 2. Valores recomendados de L_{10} .

A continuación se explican en mayor detalle los pasos para la selección de tres tipos de rodamientos muy utilizados en la práctica: los rodamientos de bolas, los rodamientos de rodillos cilíndricos y los rodamientos de rodillos cónicos.

3. SELECCIÓN DE RODAMIENTOS DE BOLAS Y DE RODILLOS CILÍNDRICOS

Los rodamientos de bolas como el de la Figura 6a pueden soportar cargas axiales y/o radiales, mientras que los de rodillos cilíndricos como el de la Figura 6b sólo pueden absorber cargas radiales (bajo carga axial se desmontan).



Figura 6. Rodamientos: a) de bolas b) de rodillos cilíndricos.

En la fórmula $C = F \cdot (L_{10})^{1/a}$ presentada en el apartado anterior, F es una fuerza puramente radial. En caso de que el rodamiento soporte simultáneamente una carga axial F_a y una carga radial F_r , se define una carga radial equivalente F_e . Esta carga radial equivalente F_e es totalmente equivalente respecto a fatiga a la combinación F_r - F_a a la que está sometido el rodamiento. La expresión de F_e es, de acuerdo a los resultados experimentales mostrados en la Figura 7:

$$F = F_e = X \cdot V \cdot F_r + Y \cdot F_a \quad (5)$$

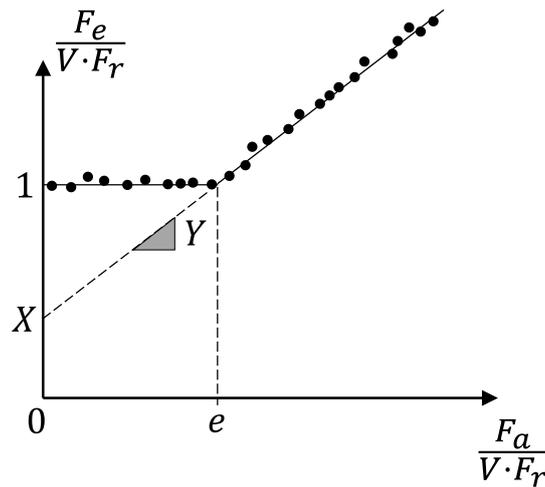


Figura 7. Resultados experimentales a partir de los cuales se obtiene la fórmula de F_e .

V es el denominado factor de rotación: su valor es 1 cuando es el aro interior el que gira, y 1.2 cuando el aro exterior gira. Los valores de X y Y se obtienen de la Tabla 3. En la tabla, e es un parámetro que depende del valor de F_a/C_0 , donde F_a es la fuerza axial que soporta el rodamiento y C_0 es la capacidad estática del rodamiento (cuyo valor viene indicado, al igual que la capacidad dinámica C , en los catálogos de fabricante).

F_a/C_0	e	$F_a/(VF_r) \leq e$		$F_a/(VF_r) > e$	
		X	Y	X	Y
0,014*	0,19	1	0	0,56	2,30
0,021	0,21	1	0	0,56	2,15
0,028	0,22	1	0	0,56	1,99
0,042	0,24	1	0	0,56	1,85
0,056	0,26	1	0	0,56	1,71
0,07	0,27	1	0	0,56	1,63
0,084	0,28	1	0	0,56	1,55
0,11	0,30	1	0	0,56	1,45
0,17	0,34	1	0	0,56	1,31
0,28	0,38	1	0	0,56	1,15
0,42	0,42	1	0	0,56	1,04
0,56	0,44	1	0	0,56	1

*Usar 0,014 si $F_a/C_0 < 0,014$

Tabla 3. Valores X , Y para calcular la carga radial equivalente F_e .

La capacidad estática C_0 se define como la carga estática que es necesaria para que se desarrolle una presión máxima de aproximadamente 4000 MPa en la zona de contacto entre el elemento rodante y la pista. Se asume que para este valor se produce el fallo estático del rodamiento, de manera que C_0 debe ser mayor que la sobrecarga instantánea $XVF_r + YF_a$ que el rodamiento pueda sufrir en algún momento puntual de su vida. Nótese

que este parámetro C_0 es algo totalmente secundario en los cálculos para la selección del rodamiento: se utiliza para calcular X , Y para la fórmula de F_e , con la que se calcula la capacidad C que es el parámetro que finalmente se utiliza para seleccionar el rodamiento. Esto es debido a que el rodamiento falla a fatiga y por tanto el parámetro fundamental para la selección del rodamiento es su capacidad dinámica de carga C .

Sin embargo, existen rodamientos que empleados en aplicaciones con giros son muy limitados y a bajas velocidades, como en grúas de construcción, aerogeneradores, excavadoras, seguidores solares, etcétera. En estos rodamientos, denominados rodamientos de vuelco, el fallo es estático, no a fatiga. En estos casos la selección del rodamiento (al menos la selección inicial) se hace en base C_0 en lugar de C .

Al seleccionar los rodamientos, éstos se encuentran ordenados por series en los catálogos. Generalmente el primer número es la serie de anchos, el segundo la serie de diámetros, tal y como se indica en la Figura 8. Y es que, a la hora de seleccionar el rodamiento, no sólo hay que hacerlo en base a su capacidad de carga, sino también en base a sus dimensiones.

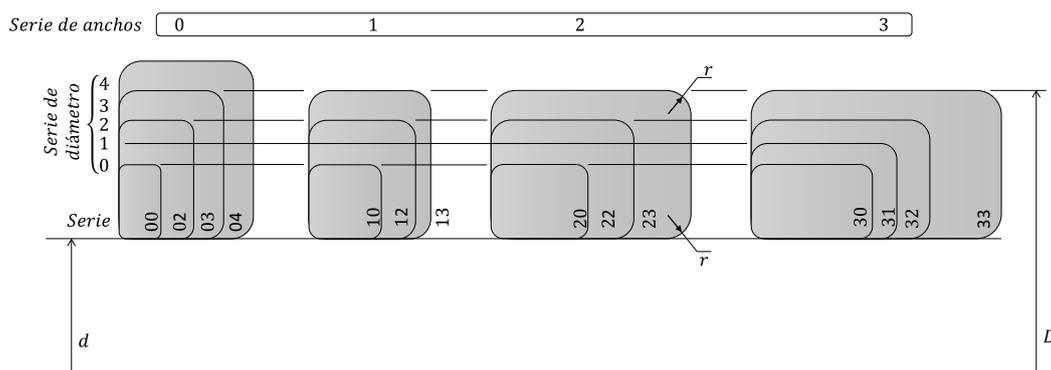


Figura 8. Series de anchos y diámetros.

La Tabla 4 muestra una hoja de catálogo con rodamientos de bolas de ranura profunda (deep groove) y contacto angular (angular contact) de la serie 02 del fabricante SKF. La Tabla 5 es para rodamientos de rodillos cilíndricos de las series 02 y 03 del mismo fabricante. Los catálogos cuentan con una gran variedad de tamaños y capacidades disponibles.

DIÁM. INT.	DIÁM. EXT.	ANCHO	RADIO DE ACUERDO	DIÁMETRO DE HOMBRO		CAPACIDAD DE CARGA			
						Rodamiento de ranura profunda		Rodamiento de contacto angular	
				d _s	d _H	C ₁₀	C ₀	C ₁₀	C ₀
10	30	9	0,6	12,5	27	5,07	2,24	4,94	2,12
12	32	10	0,6	14,5	28	6,89	3,10	7,02	3,05
15	35	11	0,6	17,5	31	7,80	3,55	8,06	3,65
17	40	12	0,6	19,5	34	9,56	4,50	9,95	4,75
20	47	14	1,0	25	41	12,7	6,20	13,3	6,55
25	52	15	1,0	30	47	14,0	6,95	14,8	7,65
30	62	16	1,0	35	55	19,5	10,0	20,3	11,0
35	72	17	1,0	41	65	25,5	13,7	27,0	15,0
40	80	18	1,0	46	72	30,7	16,6	31,9	18,6
45	85	19	1,0	52	77	33,2	18,6	35,8	21,2
50	90	20	1,0	56	82	35,1	19,6	37,7	22,8
55	100	21	1,5	63	90	43,6	25,0	46,2	28,5
60	110	22	1,5	70	99	47,5	28,0	55,9	35,5
65	120	23	1,5	74	109	55,9	34,0	63,7	41,5
70	125	24	1,5	79	114	61,8	37,5	68,9	45,5
75	130	25	1,5	86	119	66,3	40,5	71,5	49,0
80	140	26	2,0	93	127	70,2	45,0	80,6	55,0
85	150	28	2,0	99	136	83,2	53,0	90,4	63,0
90	160	30	2,0	104	146	95,6	62,0	106	73,5
95	170	32	2,0	110	156	108	69,5	121	85,0

Tabla 4. Hoja de catálogo con rodamientos de bolas de la serie 02 del fabricante SKF (dimensiones en mm y capacidades en kN).

DIÁM, INT,	SERIE 02				SERIE 03			
	DIÁM, EXT,	ANCHO	CAPACIDAD DE CARGA		DIÁM, EXT,	ANCHO	CAPACIDAD DE CARGA	
			C ₁₀	C ₀			C ₁₀	C ₀
25	52	15	16,8	8,8	62	17	28,6	15,0
30	62	16	22,4	12,0	72	19	36,9	20,0
35	72	17	31,9	17,6	80	21	44,6	27,1
40	80	18	41,8	24,0	90	23	56,1	32,5
45	85	19	44,0	25,5	100	25	72,1	45,4
50	90	20	45,7	27,5	110	27	88,0	52,0
55	100	21	56,1	34,0	120	29	102	67,2
60	110	22	64,4	43,1	130	31	123	76,5
65	120	23	76,5	51,2	140	33	138	85,0
70	125	24	79,2	51,2	150	35	151	102
75	130	25	93,1	63,2	160	37	183	125
80	140	26	106	69,4	170	39	190	125
85	150	28	119	78,3	180	41	212	149
90	160	30	142	100	190	43	242	160
95	170	32	165	112	200	45	264	189
100	180	34	183	125	215	47	303	220
110	200	38	229	167	240	50	391	304
120	215	40	260	183	260	55	457	340
130	230	40	270	193	280	58	539	408
140	250	42	319	240	300	62	682	454
150	270	45	446	260	320	65	781	502

Tabla 5. Hoja de catálogo con rodamientos de rodillos cilíndricos de las series 02 y 03 del fabricante SKF (dimensiones en mm y capacidades en kN).

4. SELECCIÓN DE RODAMIENTOS DE RODILLOS CÓNICOS

Los rodamientos de rodillos cónicos como el de la Figura 9 pueden soportar cargas axiales y/o radiales. No obstante, es importante recalcar que sólo pueden soportar cargas axiales en un sentido: en efecto, si se desplaza el anillo interior de la Figura 9 en dirección axial hacia la derecha, el rodamiento se desmonta, es decir no tiene capacidad de soportar carga axial en esa dirección. Por esta razón, en los montajes con rodillos cónicos, siempre se utilizan disposiciones con dos rodamientos “de espaldas” (montaje indirecto, Figura 10a) o “de cara” (montaje directo, Figura 10b); de esta forma, cada rodamiento soporta la carga axial en una de las direcciones.

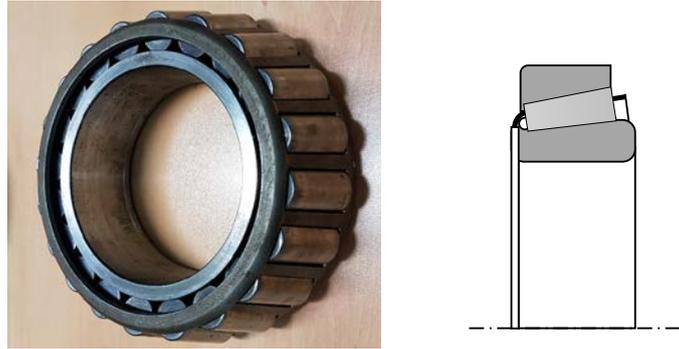


Figura 9. Rodamiento de rodillos cónicos.

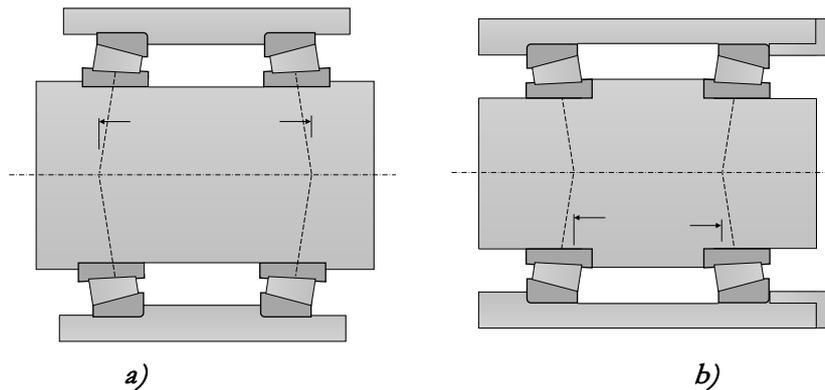


Figura 10. Montajes con rodamientos de rodillos cónicos: a) montaje indirecto b) montaje directo.

Una importante particularidad de este tipo de rodamiento es que la carga radial induce una carga axial. En efecto, si “comprimos” el anillo exterior con una fuerza radial, el anillo exterior tiende a “salirse” por la fuerza axial que se ha inducido a causa de la conicidad del rodamiento. Para una fuerza radial F_r , la fuerza axial F_a inducida es:

$$F_a = \frac{0,47 \cdot F_r}{K} \quad (6)$$

El factor K depende de la geometría del rodamiento, y su valor viene indicado en los catálogos. Para una primera selección, se puede tomar $K \approx 1,5$ o $K \approx 0,75$, en función de la inclinación del cono, tal y como se indica en la Figura 12.

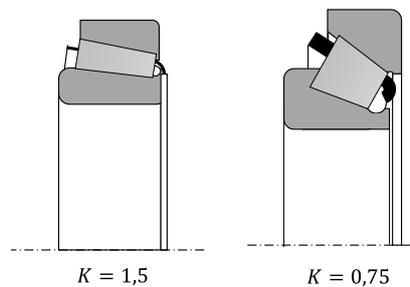


Figura 11. Valores de K para una primera selección del rodamiento de rodillos cónicos.

Así, si se analiza el montaje de la Figura 10 (cualquiera de los dos), el eje está sometido a

una fuerza axial, que es la resultante de la fuerza axial externa F_{ae} , la fuerza axial $0,47 \cdot F_{rA}/K_A$ inducida por la fuerza radial F_{rA} del rodamiento A y la fuerza axial $0,47 \cdot F_{rB}/K_B$ inducida por la fuerza radial F_{rB} del rodamiento B. En función de la dirección de esta fuerza axial resultante, será el rodamiento A o el B el que la absorba. En base a esta distinción, la Tabla 6 muestra los pasos para el cálculo de la carga radial equivalente en los rodamientos A (el de la izquierda) y B (el de la derecha), indicados como P_A y P_B . Con estas cargas P_A y P_B se obtienen los valores de C para la selección de los rodamientos.

CONDICIÓN DE EMPUJE	CARGA DE EMPUJE	CARGA DINÁMICA RADIAL EQUIVALENTE
$\frac{0,47 \cdot F_{rA}}{K_A} \leq \frac{0,47 \cdot F_{rB}}{K_B} - mF_{ae}$	$F_{aA} = \frac{0,47 \cdot F_{rB}}{K_B} - mF_{ae}$	$P_A = 0,4 \cdot F_{rA} + K_A \cdot F_{aA} *$
	$F_{aB} = \frac{0,47 \cdot F_{rB}}{K_B}$	$P_B = F_{rB} *$
$\frac{0,47 \cdot F_{rA}}{K_A} > \frac{0,47 \cdot F_{rB}}{K_B} - mF_{ae}$	$F_{aA} = \frac{0,47 \cdot F_{rA}}{K_A}$	$P_A = F_{rA} *$
	$F_{aB} = \frac{0,47 \cdot F_{rA}}{K_A} + mF_{ae}$	$P_B = 0,4 \cdot F_{rB} + K_B \cdot F_{aB} *$
* Si $P_A < F_{rA}$, usar $P_A = F_{rA}$; si $P_B < F_{rB}$, usar $P_B = F_{rB}$		
Si montaje directo, usar $m=1$; si montaje indirecto, usar $m=-1$		
Si carga axial F_{ae} aplicada en el anillo interior, F_{ae} hacia la derecha es positivo, y F_{ae} hacia la izquierda es negativo		
Si carga axial F_{ae} aplicada en el anillo exterior, F_{ae} hacia la derecha es negativo, y F_{ae} hacia la izquierda es positivo		

Tabla 6. Pasos para el cálculo de la carga radial equivalente en rodamientos de rodillos cónicos.

La Tabla 7 muestra una hoja de catálogo de rodamientos de rodillos cónicos del fabricante Timken. Para este fabricante, la capacidad dinámica de carga C se define para una duración L_{10} de 90 millones de revoluciones, de manera que la expresión a utilizar es, de forma análoga a la ecuación (4):

$$C \cdot 90^{1/a} = P_A \cdot (L_{10})^{1/a} \text{ (Rodamiento A)} \tag{7a}$$

$$C \cdot 90^{1/a} = P_B \cdot (L_{10})^{1/a} \text{ (Rodamiento B)} \tag{7b}$$

diámetro int.	diámetro ext.	ancho	L10		factor
d	D	T	radial	empuje	K
mm	mm	mm	N	N	-
25,000	52,000	16,250	8190	5260	1,56
25,000	52,000	19,250	9520	9510	1,00
25,000	52,000	22,000	13200	7960	1,66
25,000	62,000	18,250	13000	6680	1,95
25,000	62,000	25,250	17400	8930	1,95
25,159	50,005	13,495	6990	4810	1,45
25,400	50,005	13,495	6990	4810	1,45
25,400	50,005	13,495	6990	4810	1,45
25,400	50,292	14,224	7210	4620	1,56
25,400	50,292	14,224	7210	4620	1,56
25,400	51,994	15,011	6990	4810	1,45
25,400	56,896	19,368	10900	5740	1,90
25,400	57,150	19,431	11700	10900	1,07
25,400	58,738	19,050	11600	6560	1,77
25,400	59,53	23,368	13900	13000	1,07
25,400	60,325	19,842	11000	6550	1,69
25,400	61,912	19,050	12100	7280	1,67
25,400	62,000	19,050	12100	7280	1,67
25,400	62,000	19,050	12100	7280	1,67
25,400	62,000	19,050	12100	7280	1,67
25,400	62,000	20,638	12100	7280	1,67
25,400	63,500	20,638	12100	7280	1,67
25,400	63,500	20,638	12100	7280	1,67
25,400	64,292	21,433	14500	13500	1,07
25,400	65,088	22,225	13100	16400	0,8
25,400	66,421	23,812	18400	8000	2,3
25,400	68,262	22,225	15300	10900	1,4
25,400	72,233	25,400	18400	17200	1,07
25,400	72,626	30,162	22700	13000	1,76
26,157	62,000	19,050	12100	7280	1,67
26,162	63,100	23,812	18400	8000	2,3
26,162	66,421	23,812	18400	8000	2,3
26,975	68,738	19,050	11600	6560	1,77
26,988	50,292	14,224	7210	4620	1,56
26,988	60,325	19,842	11000	6550	1,69
26,988	62,000	19,050	12100	7280	1,67
26,988	66,421	23,812	18400	8000	2,3
28,575	56,896	19,845	11600	6560	1,77
28,575	57,150	17,462	11000	6550	1,69
28,575	58,738	19,050	11600	6560	1,77
28,575	58,738	19,050	11600	6560	1,77
28,575	60,325	19,842	11000	6550	1,69
28,575	60,325	19,845	11600	6560	1,77

Tabla 7. Hoja de catálogo con rodamientos de rodillos cónicos del fabricante Timken.

5. SELECCIÓN DE RODAMIENTOS CON CARGAS VARIABLES

En los apartados anteriores se ha presentado el procedimiento de selección de un rodamiento que debe soportar una determinada carga externa durante un cierto número de millones de revoluciones con una cierta fiabilidad. Sin embargo, a menudo los rodamientos deben soportar cargas externas variables a lo largo de su vida. Supóngase por ejemplo la situación de la Figura 12, en la cual el rodamiento debe soportar tres bloques de carga: una carga radial equivalente F_{e1} durante L_1 millones de revoluciones, una carga radial equivalente F_{e2} durante L_2 millones de revoluciones y una carga radial equivalente F_{e3} durante L_3 millones de revoluciones. La duda que surge es cómo calcular la capacidad C para la selección del rodamiento en este caso.

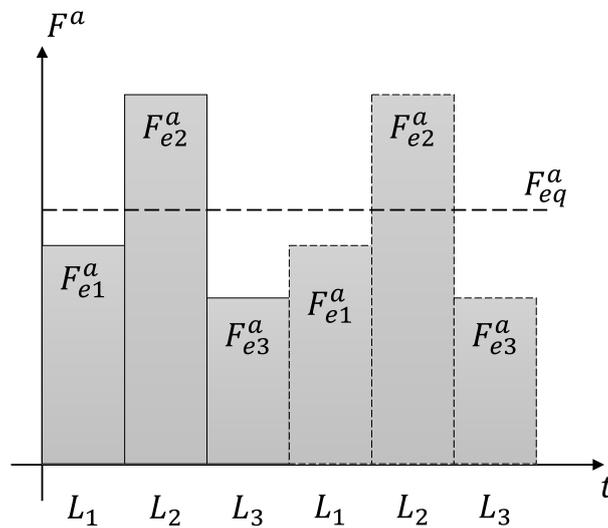


Figura 12. Cargas variables en un rodamiento.

El concepto que se utiliza para el estudio de este tipo de situaciones es el de daño acumulativo, explicado en el Tema 6. En un rodamiento, cada bloque de carga genera un daño $D_i = F_i^a \cdot L_i$, con lo que el daño total acumulado D ejercido por los tres bloques de la Figura 12 sobre el rodamiento es:

$$D = F_{e1}^a \cdot L_1 + F_{e2}^a \cdot L_2 + F_{e3}^a \cdot L_3 \quad (8)$$

Se define una carga radial equivalente F_{eq} que, aplicado durante $L_1 + L_2 + L_3$ millones de revoluciones, genera el mismo daño total D :

$$D = F_{eq}^a \cdot (L_1 + L_2 + L_3) \quad (9)$$

Igualando las expresiones (8) y (9):

$$F_{eq} = \sqrt[a]{F_{e1}^a \cdot \frac{L_1}{(L_1+L_2+L_3)} + F_{e2}^a \cdot \frac{L_2}{(L_1+L_2+L_3)} + F_{e3}^a \cdot \frac{L_3}{(L_1+L_2+L_3)}} \quad (10)$$

Y es este F_{eq} el que se utiliza para obtener la capacidad C para la selección del rodamiento:

$$C = F_{eq} \cdot (L_{10})^{1/a} \text{ (Catálogo SKF)} \quad (11a)$$

$$C \cdot 90^{1/a} = F_{eq} \cdot (L_{10})^{1/a} \text{ (Catálogo Timken)} \quad (11b)$$

6. OTROS ASPECTOS IMPORTANTES EN LOS RODAMIENTOS

Además de su correcta selección, hay otros aspectos básicos para el buen funcionamiento del rodamiento, como por ejemplo la lubricación, la alineación y el montaje del mismo.

Debido a su importancia, los catálogos de fabricantes dedican apartados a estos aspectos, explicando ideas básicas y recomendaciones al respecto como los que se mencionan a continuación.

6.1 LUBRICACIÓN

La lubricación introduce un film entre las superficies de contacto bola-pista. Los objetivos principales de la lubricación son:

- a) Reducir la fricción en el contacto (y con ello el desgaste y calor)
- b) Ayudar a distribuir y disipar el calor
- c) Prevenir la corrosión de las superficies de contacto
- d) Proteger a los componentes del rodamiento ante la entrada de suciedad

Los principales lubricantes son el aceite y la grasa. La grasa se utiliza más que el aceite, y está compuesta por 85% de aceite mineral y 15% de espesante (compuesto por litio, calcio y sodio). En un sistema de lubricación con grasa se minimizan las pérdidas por fricción hidrodinámica y las temperaturas de funcionamiento se pueden mantener bajas. Si las velocidades de funcionamiento son altas, la vida útil de la grasa se acorta y puede ser necesaria una lubricación con aceite. En términos generales, la Tabla 8 indica cuándo usar cada uno de ellos.

En cuanto a los métodos de lubricación con aceite, existen muchos tipos en función de las necesidades de cada aplicación: baño de aceite, circulación de aceite, por goteo, por salpicadura, niebla de aceite...

LUBRICACION CON GRASA	LUBRICACION CON ACEITE
Rodamiento sellado y lubricado	Rodamiento no sellado
Uso a temperatura moderada y velocidad de giro baja o media	Uso a temperatura y velocidad de giro elevadas
Ventajas	Ventajas
Buen funcionamiento con cargas elevadas	Buena refrigeración
Larga duración	Buena distribución del lubricante
Desventajas	Permite evacuar la suciedad
No evacua el calor	Desventajas
Mal comportamiento con suciedad o humedad	Vida útil más corta
Mala distribución del lubricante	Admite cargas más reducidas

Tabla 8. Recomendaciones de uso de la grasa y el aceite como lubricante en rodamientos.

6.2 ALINEACIÓN

La desalineación está limitada a valores proporcionados por los fabricantes. Una pendiente excesiva del eje en los puntos de ubicación del rodamiento acorta su vida drásticamente. La Tabla 9 muestra algunos valores orientativos (tabla mostrada anteriormente en el Tema 9).

	Pendiente máxima admisible
Rodamiento de rodillos cónicos	0.0005-0.0012 rad
Rodamiento de rodillos cilíndricos	0.0008-0.0012 rad
Rodamiento de bolas de ranura profunda	0.001-0.003 rad
Rodamiento de bolas de contacto angular	0.026-0.052 rad

Tabla 9. Valores admisibles típicos de pendientes en ejes.

6.3 MONTAJE

Los catálogos de fabricantes proporcionan explicaciones detalladas sobre disposiciones de montaje de rodamientos. Lo más habitual es que el eje esté biapoyado con un rodamiento en cada extremo, en cuyo caso la carga axial debe ser soportada únicamente por uno de los rodamientos. A veces se colocan dos rodamientos en un mismo punto para aumentar la rigidez o la capacidad de carga en ese apoyo. La Figura 13 muestra las disposiciones recomendadas en un catálogo. Observese por ejemplo el primer montaje de la Figura 13. Pese a que ambos rodamientos son de bolas de ranura profunda y por tanto tienen capacidad de absorber carga axial, uno de ellos (el derecho) se monta de manera que puede desplazarse libremente en dirección axial ya que su anillo exterior no está encajado lateralmente en el alojamiento; en consecuencia, en este montaje el rodamiento derecho trabaja como apoyo deslizante para el eje, y el rodamiento izquierdo como apoyo fijo. Todas las disposiciones de la Figura 13 trabajan de una manera similar, dando lugar a un

apoyo fijo y otro deslizante.

En cuanto al ajuste, lo ideal es que el rodamiento tenga un ajuste a presión tanto en el anillo interior como en el exterior. Sin embargo, esto es muy difícil de conseguir en la práctica, de forma que habitualmente uno de los anillos se ajusta a presión y el otro se deja con una pequeña holgura; se recomienda que el anillo que se monta a presión sea el que ve la carga radial girando respecto a él. Las tolerancias de ajuste suelen venir recomendadas en el propio catálogo de fabricante.

Disposición		Comentarios	Aplicaciones
Fijo	Flotante		
		<ol style="list-style-type: none"> 1. Disposición general para maquinarias pequeñas. 2. Para cargas radiales, pero también admite cargas axiales. 	Bombas pequeñas, automóviles, transmisiones, etc.
		<ol style="list-style-type: none"> 1. Adecuado cuando los errores de montaje y las deflexiones del eje son mínimas o para aplicaciones de alta velocidad rotacional 2. Aunque haya expansión o contracción del eje, el lado flotante se mueve fácilmente 	Motores eléctricos de tamaño mediano, ventiladores, etc.
		<ol style="list-style-type: none"> 1. Admite cargas radiales y axiales en ambas direcciones. 2. En lugar de rodamientos de bolas de contacto angular apareados, son muy empleados los rodamientos de doble hilera de bolas de contacto angular. 	Tornillos sin fin de los reductores
		<ol style="list-style-type: none"> 1. Capaz de admitir grandes cargas. 2. La rigidez del conjunto aumenta al precargar los dos rodamientos fijos, en disposición espalda con espalda. 3. Requiere de ejes y alojamientos con gran precisión de acabado y mínimos errores de montaje. 	Engranajes de reductores para la industria en general
		<ol style="list-style-type: none"> 1. Permite deflexiones del eje y errores de ajuste. 2. Por medio del empleo de un manguito de montaje en ejes largos sin tornillos u hombros, el montaje y desmontaje de los rodamientos puede ser facilitado. 3. Los rodamientos autoalineables de bolas no son adecuados para soportar cargas de dirección axial. 	Maquinaria industrial en general
		<ol style="list-style-type: none"> 1. Ampliamente utilizado en la maquinaria industrial en general, en donde se presentan cargas pesadas y cargas de choque. 2. Permite deflexiones en eje y errores de montaje. 3. Acepta cargas radiales al igual que cargas axiales de doble dirección. 	Engranajes de reductores para la industria en general
		<ol style="list-style-type: none"> 1. Admite cargas radiales y axiales en ambas direcciones. 2. Adecuado cuando ambos anillos, ext. e int., requieren ajustes apretados. 	Engranajes de reductores para la maquinaria industrial en general
		<ol style="list-style-type: none"> 1. Capaz de soportar altas cargas axiales y radiales con altas velocidades de rotación. 2. Mantiene una holgura entre el diámetro exterior del rodamiento y el diámetro interior del rodamiento, para prevenir que el rodamiento rígido de bolas reciba cargas radiales 	Transmisiones de locomotoras a diesel

Disposición		Comentarios	Aplicaciones
Fijo	Flotante		
		<ol style="list-style-type: none"> 1. Es una disposición general utilizada en máquinas pequeñas. 2. Se precarga con calzas y resortes en la cara del anillo exterior (puede ser en el lado flotante). 	Motores eléctricos, reductores de engranajes, etc.
		<ol style="list-style-type: none"> 1. Disposición espalda con espalda es preferible a una disposición cara contra cara, cuando se aplica carga de momento. 2. Es capaz de soportar cargas axiales y radiales; son adecuados cuando haya altas velocidades. 3. La rigidez del eje puede ser aumentada por el efecto de la precarga. 	Máquinas herramientas de alta velocidad, etc.
		<ol style="list-style-type: none"> 1. Es capaz de soportar cargas de impacto y extra pesadas. 2. Es adecuado si los anillos internos y externos requieren un ajuste apretado. 3. Se debe cuidar que el juego axial no llegue a ser muy pequeño durante la operación. 	Equipo de construcción, equipo de minería, roldanas, agitadores, etc.
		<ol style="list-style-type: none"> 1. Soportan cargas pesadas y cargas de impacto. Tienen amplio rango de aplicaciones. 2. La rigidez del eje se mejora al precargarlo, pero esta precarga no debe ser excesiva. 3. La disposición espalda con espalda es para carga de momento, y la disposición cara contra cara es para aliviar errores de ajuste. 4. Con la disposición cara contra cara, se facilita el ajuste apretado en el anillo exterior. 	Reductores, ruedas delanteras de coches, etc.

Figura 13. Tipos de montaje recomendados en un catálogo de rodamientos.