



**LABORATORIO DE
TECNOLOGÍAS IV**
**INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL
MECÁNICA**

PRÁCTICA 5

“RODAMIENTOS”

*DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
Febrero de 2005*



Índice

0	Tipos de Rodamientos	4
1	Generalidades	9
1.1.	Espacio Disponible	14
1.2.	Cargas	14
1.2.1.	Carga Radial	14
1.2.2.	Carga Axial	15
1.2.3.	Carga Combinada	15
1.2.4.	Momentos	15
1.3.	Desalineamientos	16
1.4.	Precisión	16
1.5.	Velocidad	16
1.6.	Funcionamiento Silencioso	17
1.7.	Rigidez	17
1.8.	Temperatura de Funcionamiento	17
2.	Normalización	18
3.	Selección del Tamaño del Rodamiento	19
3.1.	Capacidad de Carga Dinámica	19
3.2.	Capacidad de Carga Estática	20
4.	Vida	20
4.1.	Selección del Tamaño utilizando la fórmula de vida	21
4.2.	Cálculo de la vida nominal para rodamientos oscilantes	22
4.3.	Vida nominal requerida	23
4.4.	Vida nominal ajustada	24
4.4.1.	Factor a_1	25
4.4.2.	Factor a_2	25
4.4.3.	Factor a_3	26
4.4.4.	Combinación de Factores a_2 y a_3	27
4.5.	Fórmula de vida de acuerdo con la teoría SKF	28
4.5.1.	Factor SKF	28
4.5.2.	Factor ajustado por la contaminación	29
5.	Ejemplo de aplicación	30
6.	Cálculo de Carga Dinámica	33
6.1.	Carga Dinámica Equivalente	34
6.2.	Carga Fluctuante	35
6.3.	Carga mínima Requerida	36
7.	Selección del tamaño utilizando la capacidad de Carga Estática	37
7.1.	Carga estática equivalente	38
7.2.	Capacidad de Carga Estática necesaria	39
8.	Datos Generales de Rodamientos	40
8.1.	Dimensiones	40
8.2.	Tolerancias	41

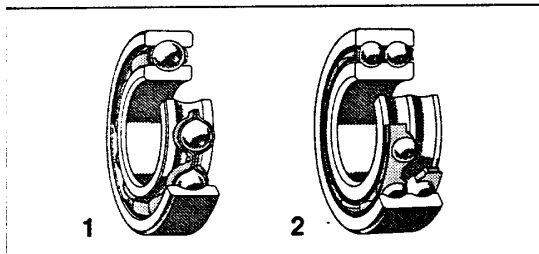


8.3.	Nomenclatura	41
8.4.	Juego Interno	41
8.5.	Materiales	42
8.5.1.	Aceros para elementos rodantes	42
8.5.2.	Material para las Jaulas	43
9.	Disposición de los Rodamientos	43
9.1.	Fijación Radial	44
9.1.1.	Magnitud de la Carga	45
9.2.2.	Juego interno del rodamiento	45
9.2.3.	Condición de Temperatura	45
9.3.4.	Facilidad de Montaje y Desmontaje	45
9.2.	Fijación Axial	46
9.3	Precarga de los Rodamientos	46
9.3.1.	Tipos de Precarga	47
9.3.2.	Efectos de la Precarga	47
10	Práctica de cálculo de vida de rodamiento utilizando un programa de simulación de SKF	49

Tipos de Rodamientos.

Un rodamiento es un elemento mecánico que sirve para soportar las cargas, tanto estáticas como dinámicas de un sistema que esté sometido a movimientos rotativos. En función del tipo de carga y de la configuración del sistema se definen distintos tipos de rodamientos normalizados que se pueden seleccionar de los catálogos de los fabricantes. También es posible diseñar rodamientos para aplicaciones especiales con medidas distintas de las normalizadas, aunque esto encarece mucho el producto.

En las figuras siguientes se resumen los tipos de rodamientos normalizados más usuales.



Rodamientos radiales

Rodamientos rígidos de bolas

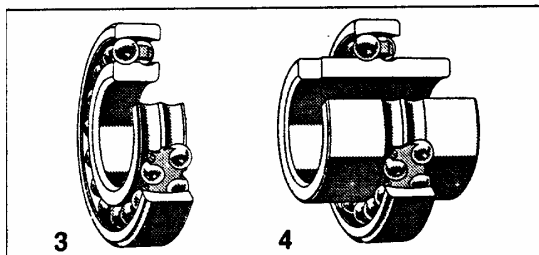
de una hilera^{*)} (1)

con placa(s) de protección o de obturación

con ranura para anillo elástico en el aro exterior (y anillo elástico)

de dos hileras (2)

^{*)} ver también el catálogo SKF "Rodamientos de sección estrecha"

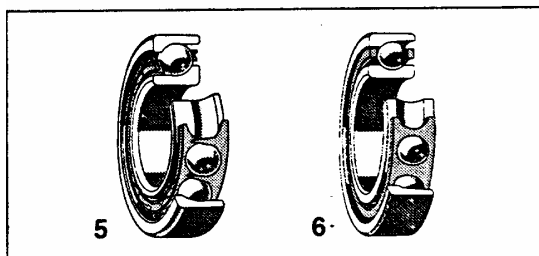


Rodamientos de bolas a rótula

con agujero cilíndrico o cónico (3)

con placas de obturación

con aro interior prolongado (4)



Rodamientos de bolas con contacto angular

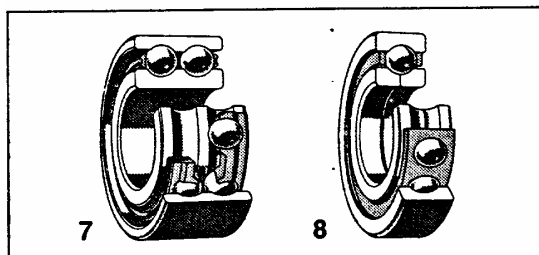
de una hilera^{*)} (5)

apareados

rodamientos de precisión^{**)} (6)

^{*)} ver también el catálogo SKF "Rodamientos de sección estrecha"

^{**)} ver también el catálogo SKF "Rodamientos de precisión"



de dos hileras (7)

con placa(s) de protección o de obturación

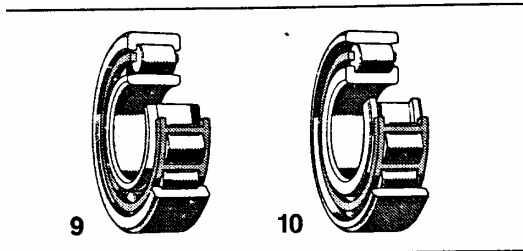
Rodamientos de bolas de cuatro puntos de contacto^{*)} (8)

^{*)} ver también el catálogo SKF "Rodamientos de sección estrecha"

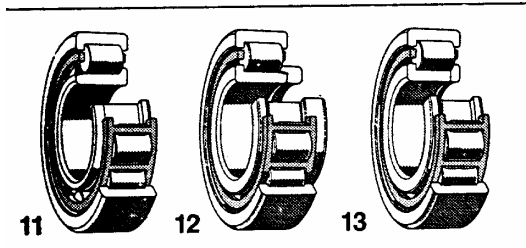
Rodamientos radiales

Rodamientos de rodillos cilíndricos

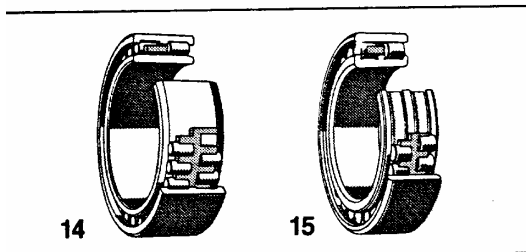
de una hilera
tipo NU (9)
tipo N (10)



tipo NJ (11)
tipo NJ con aro angular HJ (12)
tipo NUP (13)

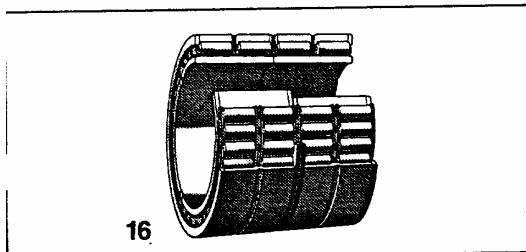


de dos hileras^{*)}
tipo NNU (14)
tipo NN (15)



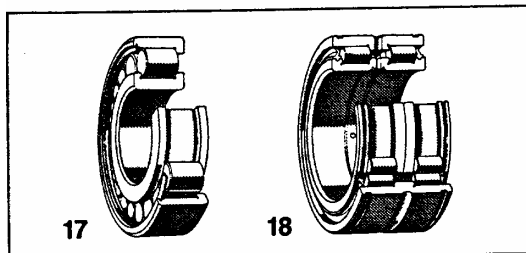
^{*)} ver los catálogos SKF "Rodamientos para aplicaciones de ingeniería pesada" y "Rodamientos de precisión"

de cuatro hileras^{*)}
con agujero cilíndrico (16) o cónico



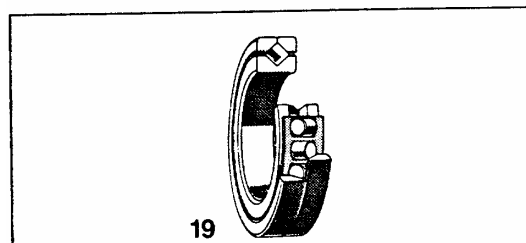
^{*)} ver el catálogo SKF "Rodamientos para aplicaciones de ingeniería pesada"

Rodamientos completamente llenos de rodillos cilíndricos
de una hilera (17)
de dos hileras
con (18) o sin placas de obturación
de varias hileras^{*)}



^{*)} ver el catálogo SKF "Rodamientos para aplicaciones de ingeniería pesada"

Rodamientos de rodillos cilíndricos cruzados (19)



Rodamientos radiales

Rodamientos de agujas

Casquillos de agujas

sin fondo (20) y con fondo

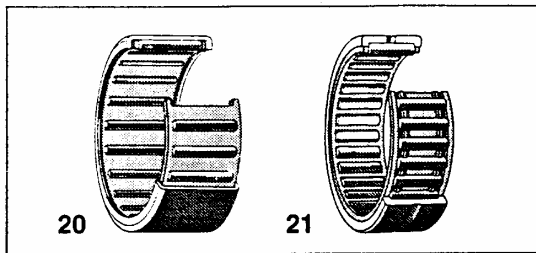
Rodamientos de agujas con pestañas

con o sin aro interior (21)

con placa(s) de obturación

Rodamientos de agujas sin pestañas^{*)}

con o sin aro interior

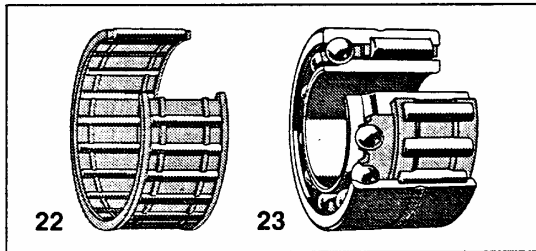


^{*)} ver el catálogo SKF "Rodamientos de agujas"

Coronas de agujas^{*)} (22)

Rodamientos combinados de agujas^{*)} (23)

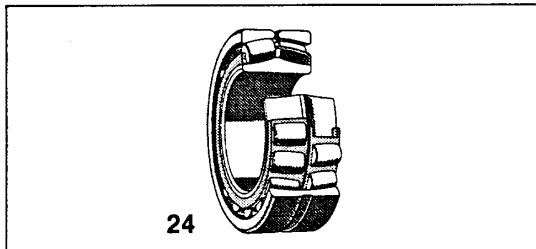
Rodamientos de agujas a rótula^{*)}



^{*)} ver el catálogo SKF "Rodamientos de agujas"

Rodamientos de rodillos a rótula

con agujero cilíndrico (24) o cónico

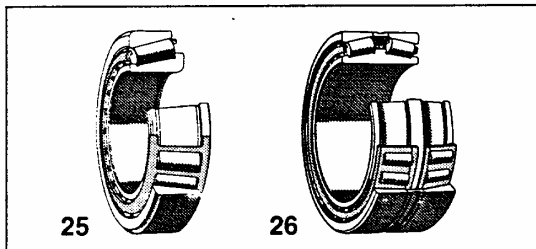


Rodamientos de rodillos cónicos

de una hilera (25)

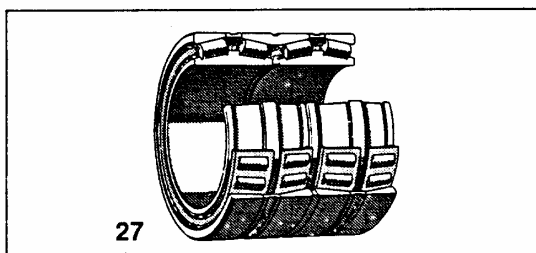
apareados

de dos hileras^{*)} (26)



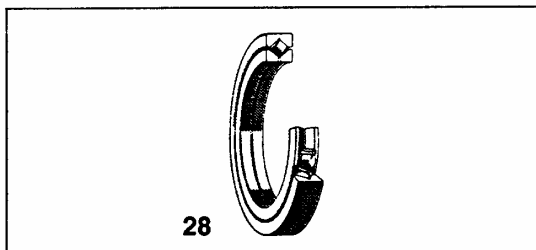
^{*)} ver el catálogo SKF "Rodamientos para aplicaciones de ingeniería pesada"

de cuatro hileras^{*)} (27)



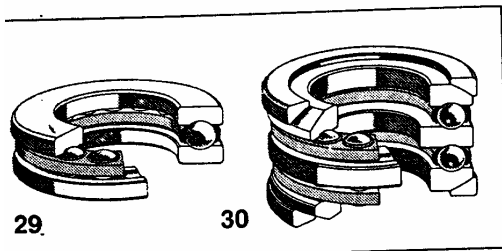
^{*)} ver el catálogo SKF "Rodamientos para aplicaciones de ingeniería pesada"

Rodamientos de rodillos cónicos cruzados^{*)} (28)



^{*)} ver el catálogo SKF "Rodamientos de precisión"

Rodamientos axiales



Rodamientos axiales de bolas

de simple efecto

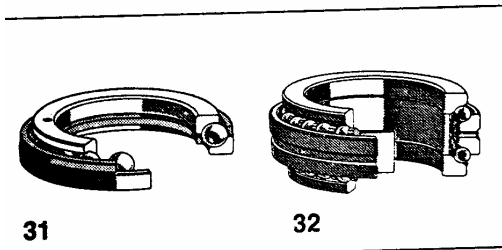
con asiento plano en la arandela de alojamiento (29)

con asiento esférico en la arandela de alojamiento y contraplaca

de doble efecto

con asiento plano en las arandelas de alojamiento

con asiento esférico en las arandelas de alojamiento y contraplacas (30)

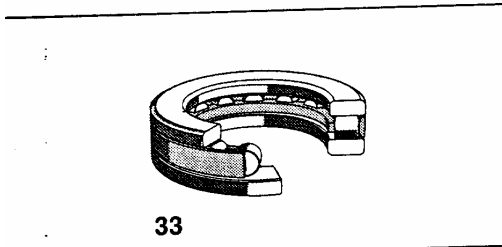


Rodamientos axiales de bolas con contacto angular

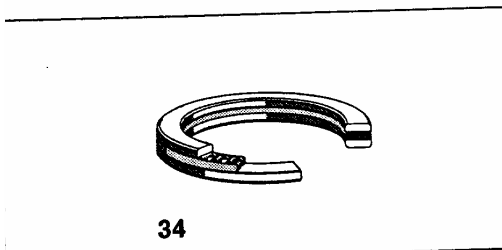
de simple efecto*) (31)

de doble efecto*) (32)

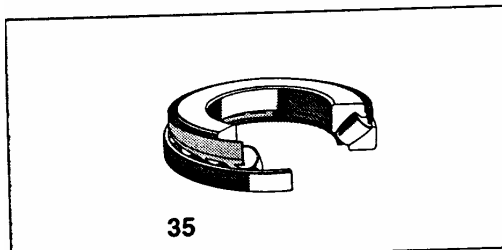
*) ver los catálogos SKF "Rodamientos para aplicaciones de ingeniería pesada" y "Rodamientos de precisión"



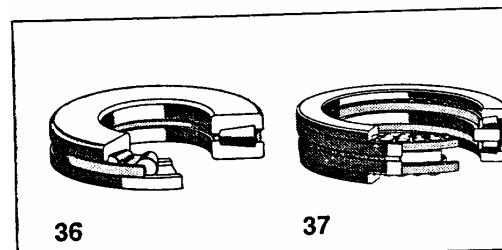
Rodamientos axiales de rodillos cilíndricos (33)



Rodamientos axiales de agujas (34)



Rodamientos axiales de rodillos a rótula (35)

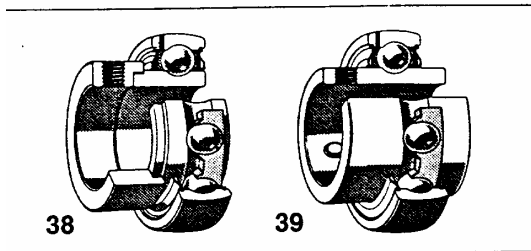


Rodamientos axiales de rodillos cónicos de simple efecto*) (36)

de doble efecto*) (37)

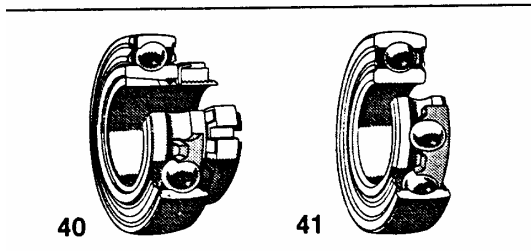
*) ver el catálogo SKF "Rodamientos para aplicaciones de ingeniería pesada"

Rodamientos Y, roldanas

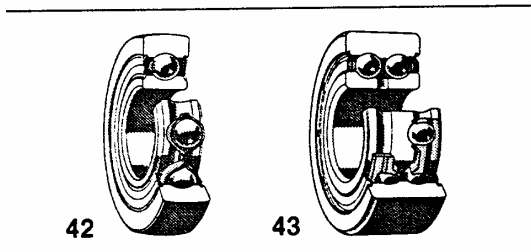


Rodamientos Y

- con anillo de fijación excéntrico con aro interior prolongado por un lado (38)
- con aro interior prolongado por ambos lados con prisioneros de fijación (39)

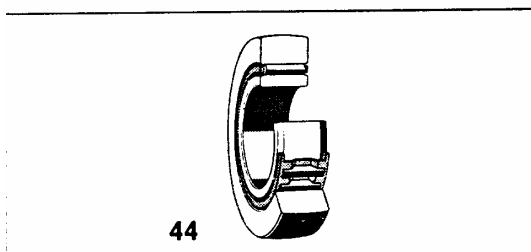


- con manguito de fijación (40)
- con aro interior normal (41)



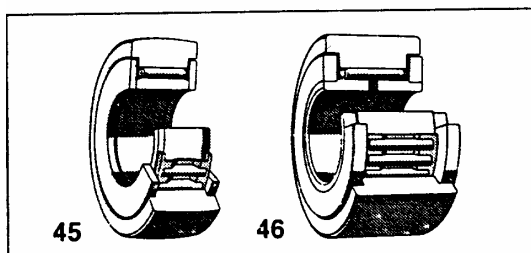
Rodillos de leva

- serie estrecha con superficie de rodadura bombeada (42)
- serie ancha con superficie de rodadura bombeada o cilíndrica (43)

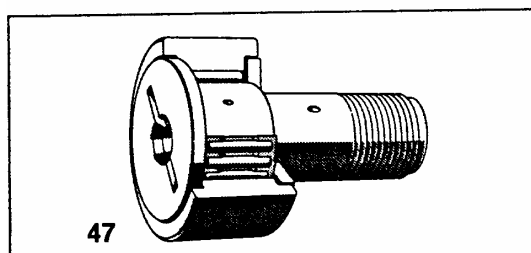


Rodillos de apoyo

- sin guiado axial con superficie de rodadura bombeada (44) o cilíndrica con o sin aro interior con o sin placas de obturación



- con guiado axial con superficie de rodadura bombeada o cilíndrica diseño desarmable (45) diseño no desarmable con jaula (46) llenos de rodillos



Rodillos de leva con eje

- con superficie de rodadura bombeada o cilíndrica con jaula (47) llenos de rodillos



Selección de Rodamientos

1.- Generalidades.

Los árboles, ejes y en general todos aquellos elementos mecánicos que poseen un movimiento de rotación alrededor de un eje geométrico y están sometidos a cargas, precisan de un elemento que facilite su movimiento de rotación, de forma que se sustituya el movimiento de rozamiento por deslizamiento por un movimiento de rodadura.

La extensión y variedad de aplicaciones de los rodamientos precisan de una gran diversidad de concepción y una amplia gama dimensional para responder al conjunto de las necesidades del usuario.

Cada tipo de rodamiento presenta propiedades características que dependen de su diseño y que lo hacen más o menos adecuados para una aplicación determinada.

“Los rodamientos no se diseñan, se seleccionan”.

La elección de un rodamiento se basa en el análisis de los principales parámetros de funcionamiento y las exigencias del usuario. Estos parámetros pueden ser:

- - Duración de vida requerida
- - Importancia de las cargas aplicadas
- - Espacio disponible y el entorno
- - Condiciones de funcionamiento:
 - Velocidad
 - Temperatura
 - Lubricación
 - Juego
 - Vibraciones
 - Choques



Por ejemplo, los rodamientos rígidos de bolas pueden soportar cargas radiales medias, así como cargas axiales. Tienen bajo rozamiento, un funcionamiento silencioso y pueden producirse con una alta precisión por lo que son muy utilizados en motores eléctricos de tamaño pequeño y medio.

Los rodamientos de rodillos a rótula pueden soportar cargas muy pesadas y son autoalineables. Estas propiedades hacen que sean especialmente adecuados, para aplicaciones de ingeniería pesada.

Comentaremos brevemente, cada uno de los factores que influyen en la selección de los rodamientos:

1.1.- Espacio disponible.

En muchos casos al menos una de las dimensiones del rodamiento viene definida por el espacio disponible dentro de la máquina, o bien el diámetro del eje. Así por ejemplo, cuando el espacio radial disponible está limitado, es necesario utilizar rodamientos de agujas

1.2.- Cargas.

Este es el factor más importante para determinar el tamaño del rodamiento. En general y para un mismo tamaño, los rodamientos de rodillos soportan mayores cargas que los de bolas y los rodamientos llenos de elementos rodantes pueden soportar cargas más grandes que aquellos que utilizan jaulas. Es también importante conocer la dirección de la carga para la correcta selección del rodamiento.

1.2.1.- Carga Radial.

En general, salvo los rodamientos de radiales de agujas, todos los rodamientos pueden soportar cargas axiales más o menos moderadas.



1.2.2.- Carga axial.

En el caso de tener cargas axiales moderadas y pequeñas se pueden utilizar rodamiento de bolas. Existen rodamientos de bolas preparados para soportar cargas axiales elevadas, pero solo en un sentido. Cuando las cargas axiales son importantes, se recomienda utilizar rodamientos de rodillos cónicos o de rodillos a rótula.

1.2.3.- Cargas combinadas.

Una carga combinada consta de una carga radial y otra axial actuando simultáneamente.

La capacidad que tiene un rodamiento para soportar carga axial depende del ángulo de contacto α , cuanto mayor es este ángulo, mayor es la capacidad para soportar carga axial.

Existe un parámetro para introducir este comportamiento en los cálculos de vida, este parámetro se denomina coeficiente "Y" y disminuye al aumentar α , proporcionando una indicación de la capacidad de soportar cargas axiales.

Para soportar cargas combinadas se suelen utilizar rodamientos de bolas de contacto angular de un o dos hileras o bien rodamientos de rodillos cónicos.

Los rodamientos de rodillos cónicos de una hilera o bien los rodamientos de bolas de contacto angular solo pueden soportar cargas axiales en un sentido, por lo que deberán combinarse con otra pareja similar, en caso de que la carga axial sea fluctuante.

1.2.4.- Momentos.

Cuando la carga actúa de forma excéntrica sobre el rodamiento pueden originarse momentos flectores sobre el mismo. Los rodamientos de dos hileras, tanto rígidos de bolas como de contacto angular, pueden soportar momentos flectores moderados, pero son más adecuados las parejas de una hilera de bolas con contacto angular o de rodillos cónicos, sobre todo en la disposición



espalda con espalda, así como los rodamientos de rodillos cilíndricos cruzados o rodillos cónicos cruzados.

1.3.- Desalineaciones.

En algunos casos, la flexión del eje debido a las cargas de funcionamiento, pueden originar desalineamientos angulares entre el eje y el soporte. También se pueden producir desalineamientos cuando los alojamientos de los rodamientos no han sido mecanizados en una sola operación, o cuando los ejes están soportados por rodamientos separados una gran distancia entre sí.

Los rodamientos rígidos no pueden compensar desalineación alguna o bien su capacidad para absorber desalineaciones es muy pequeña, sin que aparezcan sobrecargas excesivas. En estos casos se deben utilizar rodamientos de bolas a rótula, de rodillos a rótula o los axiales de rodillo a rótula.

1.4.- Precisión.

Existen casos en que se requiere el uso de rodamientos con un grado de precisión mayor que el normal, por ejemplo en los cabezales de los husillos de las máquinas herramientas, en estos casos existen series especiales de alta precisión.

1.5.- Velocidad.

La velocidad a la cual un rodamiento puede funcionar viene limitada por la temperatura máxima permisible de funcionamiento. Cuanto menor es el rozamiento interno mayor es la velocidad máxima a la que puede girar un rodamiento.

Las mayores velocidades se obtienen con rodamientos rígidos de bolas, cuando las cargas son radiales puras o bien los rodamientos de bola de contacto angular cuando las cargas son combinadas.



Existen series especiales de rodamientos de precisión con jaulas específicas que permiten alcanzar velocidades elevadas.

Además la velocidad puede aumentarse modificando:

- La precisión en la ejecución del rodamiento.
- Modificando la concepción de la jaula con unos materiales apropiados.
- Mejorando la lubricación (grasas especiales, etc.)

1.6.- Funcionamiento silencioso.

Existen aplicaciones en las que un funcionamiento silencioso es una exigencia prioritaria, por ejemplo, en pequeños motores eléctricos para electrodomésticos, equipos de oficina, etc. Existen ejecuciones especiales en rodamientos rígidos de bolas que resultan muy silenciosos.

1.7.- Rigidez.

La rigidez de un rodamiento se caracteriza por la magnitud de la deformación elástica del rodamiento cargado. En la mayoría de los casos esta deformación es muy pequeña y puede despreciarse. Solo en casos especiales de rodamientos de precisión (husillos de máquinas herramientas) la rigidez es un factor importante.

Debido a las condiciones de contacto entre los elementos rodantes y los caminos de rodadura, los rodamientos de rodillos son más rígidos que los de bolas.

La rigidez de un rodamiento puede aumentarse aplicando una precarga de montaje.

1.8.- Temperatura de funcionamiento.

El tratamiento térmico aplicado a los rodamientos de fabricación normal permite su utilización, en funcionamiento continuo, hasta una temperatura de 120 °C sin que se produzcan pérdidas de dureza o una variación dimensional sensible.



Por encima de esta temperatura, la pérdida de dureza origina una reducción de las cargas de base según el siguiente cuadro:

Temperatura de funcionamiento	150 °C	175 °C	200 °C	240 °C
Reducción de la carga base	5 %	12 %	15 %	26 %

Dado que la transformación del metal es irreversible, esta reducción es permanente. Además la variación dimensional puede influir en los ajustes y en el juego interno del rodamiento.

2.- Normalización.

En la tabla adjunta se indican las normas relativas a los diferentes criterios de cálculo y selección de rodamientos.

Criterio de apreciación	Elemento sometido a lo criterios	Norma ISO	Norma AFNOR
Dimensiones	Rod. de bolas y de rodillos	ISO 15	NF E 22 315
	Rod. rodillos cónicos	ISO 355	NF E 22 330
	Rod. con ranura	ISO 464	NF E 22 302
	Segmentos de retención	ISO 464	NF E 22 303
	Rodamientos axiales	ISO 104	NF E 22 320
	Anillos de apoyo para rod. de rodillos cilíndricos	ISO 246	NF E 22 308
	Manguitos cónicos	ISO 113	NF E 22 308
	Soportes	ISO 113	NF E 22 309
	Dimensiones Límites de radios de unión	ISO 582	



Criterio de apreciación	Elemento sometido a lo criterios	Norma ISO	Norma AFNOR
Precisión	Rodamientos radiales	ISO 492	NF E 22 316
	Rod. de rodillos cónicos	ISO 492	NF E 22 335
	Rodamientos axiales	ISO 199	NF E 22 321
Juego	Juego interno radial	ISO 5753	NF E 22 316
Cargas de base	Dinámica	ISO 281	NF E 22 392
	Estática	ISO 76	NF E 22 391

3.- Selección del tamaño del rodamiento.

El tamaño del rodamiento necesario para una aplicación determinada se selecciona inicialmente en base a su capacidad de carga comparada con las cargas que previsiblemente tendrá que soportar en servicio y las exigencias en cuanto a duración y fiabilidad requeridas para la aplicación en cuestión.

En todos los catálogos se encuentran dos valores para la capacidad de carga, la **capacidad de carga estática "C_o"** y la **capacidad de carga dinámica "C"**.

3.1.- Capacidad de carga dinámica.

Se utiliza en los cálculos en los que los rodamientos van a estar sometidos a esfuerzos dinámicos. Expresa la carga que puede soportar un rodamiento de forma que pueda alcanzar una vida de 1.000.000 de revoluciones.

La capacidad de carga dinámica se calcula por el fabricante de acuerdo con los métodos descritos en la norma ISO 281.



3.2- Capacidad de carga estática.

Se utiliza en los cálculos en los que los rodamientos giran a velocidades muy bajas, están sometidos a movimientos lentos de oscilación o cuando están estacionarios bajo carga durante ciertos periodos de tiempo. También hay que tenerla en cuenta cuando el rodamiento esté sometido a cargas dinámicas pero se prevean importantes cargas de choque de corta duración.

La capacidad de carga estática está definida según ISO 76 como la carga estática que corresponde con una tensión calculada en el centro de la superficie de contacto más cargada entre elementos rodantes y camino de rodadura de:

- 4.600 MPa para rodamientos de bolas a rótula
- 4.200 MPa para rodamientos de bolas
- 4.000 MPa para todos los demás rodamientos de rodillos

Esta tensión produce una deformación permanente total del elemento rodante y del camino de rodadura aproximadamente igual a 0.0001 el diámetro del elemento rodante.

4.-Vida.

La vida de un rodamiento se define como el número de revoluciones (o de horas a velocidad cte. determinada) que el rodamiento puede funcionar antes de que manifieste el primer signo de fatiga (generalmente desconchado) en uno de los aros o en los elementos rodantes.

Sin embargo numerosos ensayos han demostrado que rodamientos aparentemente idénticos, funcionando en condiciones idénticas, tienen vidas diferentes. Por lo tanto es esencial para el cálculo de la vida de un rodamiento definir un límite de fiabilidad, que se corresponde con el porcentaje de componentes de un población que sobrepasan una vida dada.



Generalmente la capacidad de carga dinámica de un rodamiento se basa en la vida alcanzada por al menos el 90 % de los rodamientos aparentemente idénticos. A esta vida se la denomina vida nominal y está de acuerdo con la definición dada por la norma ISO. La vida media de los rodamientos es aproximadamente cinco veces la vida nominal.

Existen otros conceptos de vida, como por ejemplo la “**vida en servicio**” que es la duración real alcanzada por un rodamiento antes de fallar. El fallo generalmente no se debe en primer lugar a la fatiga sino a desgastes, corrosión, fallo en las obturaciones...

4.1.- Selección del tamaño del rodamiento utilizando la fórmula de vida

La fórmula de vida nominal que utiliza la norma ISO para el cálculo sencillo es:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^n$$

- Donde:

- L_{10} = Vida nominal en millones de revoluciones
- C = Capacidad de carga dinámica en Newtons
- P = Carga dinámica equivalente en Newtons
- n = Exponente de la fórmula que vale:
 - $n = 3$ para rodamientos de bolas
 - $n = 10/3$ para rodamientos de rodillos

En el caso de que el rodamiento funcione a velocidad cte. se puede expresar la duración nominal en horas mediante la ecuación:

$$L_{10H} = \frac{10^6}{60 * N} \left(\frac{C}{P} \right)^n$$

siendo N la velocidad de giro en revoluciones por minuto.



En el caso de rodamientos de vehículos de carretera y ferrocarril, especialmente cuando se trata de rodamientos de cubos de rueda y cajas de grasa, puede ser preferible expresar la vida en términos de kilómetros recorridos. Para este cálculo se puede emplear la siguiente fórmula:

$$L_{10S} = \frac{\pi * D}{1000} L_{10}$$

Donde:

L_{10S} = vida nominal en millones de kilómetros
D = diámetro de la rueda en metros.

4.2.- Cálculo de la vida nominal para rodamientos Oscilantes

Si un rodamiento en lugar de girar, oscila desde una posición central un ángulo de $\pm\gamma$ de acuerdo con la figura adjunta, entonces:

$$L_{10OSC} = \frac{180}{2 * \gamma} L_{10}$$

Donde:

- L_{10OSC} = Vida nominal en millones de ciclos
- γ = Amplitud de la oscilación (ángulo de máxima desviación respecto de la posición central).

Cuando la amplitud de las oscilaciones γ es muy pequeña, carece de sentido el cálculo de vida nominal del rodamiento, y directamente se selecciona en función de la carga estática.



4.3.- Vida nominal requerida.

Para determinar el tamaño de un rodamiento, los cálculos normalmente se realizan en base a una vida nominal (L_{10}) del rodamiento, por lo cual es esencial conocer la "vida nominal requerida" para la aplicación considerada. Este nivel de vida depende generalmente del tipo de elemento que se considere y de las exigencias en lo referente a la vida en servicio, responsabilidad del componente y la fiabilidad del mismo. Si no se tiene experiencia, se pueden utilizar las tablas adjuntas como recomendaciones de vida nominal requerida

GUIA DE VALORES REQUERIDOS DE VIDA NOMINAL L_{10H} PARA DIFERENTES CLASES DE MÁQUINAS

Clase de Máquina	L_{10h}
Electrodomésticos, Máquinas agrícolas, Instrumentos, aparatos para uso médico.	300~3000 horas
Máquinas utilizadas en periodos cortos: Elevadores para talleres, maquinas para la construcción, máquinas-herramienta portátiles	3.000~8000 horas
Máquinas para trabajar con alta fiabilidad de funcionamiento en periodos cortos o intermitentes: Ascensores, grúas para mercancías.	8.000~12.000 horas
Máquinas para 8 horas de trabajo diaria no totalmente utilizadas: Máquina-herramienta, grúas para material a granel, ventiladores, cintas transportadoras, imprentas, centrifugadoras...	20.000~30.000 horas
Máquinas para trabajo continuo, 24 horas al día: Cajas de engranajes para laminadoras, maquinaria eléctrica de tamaño medio, compresores, tornos de extracción de minas, bombas, maquinaria textil...	40.000~50.000 horas
Máquinas para abastecimiento de agua, hornos giratorios, cableadoras, propulsión de transatlánticos	60.000~100.000 horas
Maquinaria eléctrica de gran tamaño, centrales eléctricas, ventiladores y bombas para minas, rodamientos para líneas de eje de transatlánticos	~100.000 horas



GUIA DE VALORES REQUERIDOS DE VIDA NOMINAL L_{10s} PARA VEHÍCULOS DE CARRETERA Y FERROVIARIOS EN MILLONES DE KILÓMETROS

Tipo de vehículo	L_{10s}
Rodamientos para cubo de rueda en vehículos de carretera :	
Automóviles	0.3
Camiones y autobuses	0.6
Rodamientos para cajas de grasa de vehículos ferroviarios :	
Vagones de mercancía	0.8
Material móvil de cercanías, tranvías	1.5
Coches de pasajeros para grandes líneas	3
Coches automotores para grandes líneas	3 a 4
Locomotoras eléctricas y diesel	3 a 5

4.4.-Vida nominal ajustada.

La fórmula considerada para los cálculos de vida solo tiene en cuenta la influencia que tiene la carga aplicada sobre el rodamiento. Sin embargo la experiencia nos dice que existe una serie de factores que pueden influir notablemente en la vida de un elemento, como por ejemplo la lubricación.

Para tener en cuenta la influencia de estos factores la norma ISO introduce el concepto de vida nominal ajustada, mediante la fórmula siguiente:

$$L_{na} = a_1 * a_2 * a_3 * \left(\frac{C}{P} \right)^n$$

o bien:

$$L_{na} = a_1 * a_2 * a_3 * L_{10}$$

Donde:



- L_{na} = vida nominal ajustada en millones de revoluciones.
- a_1 = Factor de ajuste de la vida por fiabilidad
- a_2 = Factor de ajuste de la vida por el material
- a_3 = Factor de ajuste de la vida por las condiciones de funcionamiento.

4.4.1.- Factor " a_1 "

Este factor se utiliza para determinar la vida con una fiabilidad distinta a la nominal del 90 %. En la tabla siguiente se resumen los valores que puede tomar a_1 en función de la fiabilidad con la que se requiera trabajar:

Fiabilidad %	L_{na}	a_1
90	L_{10a}	1
95	L_{5a}	0.62
96	L_{4a}	0.53
97	L_{3a}	0.44
98	L_{2a}	0.33
99	L_{1a}	0.21

4.4.2.- Factor " a_2 "

Para la determinación de la capacidad de carga dinámica, se ha tenido en cuenta el material definido en la norma ISO 281, sin embargo algunos fabricantes utilizan aceros de mejores características de los que indican en la norma.

Cuando el material empleado es el indicado en la norma el factor $a_2 = 1$, pero en función de los materiales utilizados este factor puede aumentar considerablemente. Cada fabricante proporciona unos valores de a_2 para sus rodamientos, aunque lo que se suele hacer es aumentar la capacidad de carga dinámica " C " en las tablas de selección de rodamientos, dando un valor calculado según la norma ISO y otro valor corregido por el tipo de acero utilizado.

4.4.3.- Factor " a_3 "



Este factor viene determinado por las condiciones de funcionamiento, esencialmente por el tipo de lubricación, siempre que las temperaturas de funcionamiento no sean excesivas.

El grado de separación entre las superficies en el contacto de rodadura determina, en principio, la eficacia de la lubricación. Para que se pueda formar una película de lubricante con la capacidad de carga adecuada, se debe especificar una viscosidad mínima a la temperatura de trabajo.

En condiciones de limpieza normales y con una disposición de rodamientos bien obturada, el factor a_3 se basa en la relación de viscosidad denominada " κ ". Este parámetro se define como la relación entre la viscosidad real del lubricante " ν " y la viscosidad necesaria para una lubricación adecuada " ν_1 ". Ambos valores son viscosidades cinemáticas a la temperatura de funcionamiento.

Para rodamientos que en lugar de girar realicen movimientos oscilantes, se debe utilizar una velocidad de giro equivalente para entrar en el diagrama nº 1. Esta velocidad se puede calcular con la fórmula:

$$n = \frac{2 * \gamma}{180} * n_{osc}$$

donde:

- n = Velocidad de giro equivalente en rpm
- n_{osc} = Frecuencia de oscilación en ciclos/minuto
- γ = Amplitud de las oscilaciones en grados.

En la tabla siguiente se resumen las clases de viscosidad ISO para los aceites de lubricación y los campos de viscosidad pertinentes a 40 ° C

Clase ISO de	Viscosidad cinemática a 40 °C
--------------	-------------------------------



Viscosidad			
mm ² /s	Media	Mínima	Máxima
ISO VG2	2.2	1.98	2.42
ISO VG3	3.2	2.88	3.52
ISO VG5	4.6	4.14	5.06
ISO VG7	6.8	6.12	7.48
ISO VG10	10	9	11
ISO VG15	15	13.15	16.5
ISO VG22	22	19.8	24.2
ISO VG32	32	28.8	35.2
ISO VG46	46	41.4	50.6
ISO VG68	68	61.2	74.8
ISO VG100	100	90	110
ISO VG150	150	135	165
ISO VG220	220	198	242
ISO VG320	320	288	352
ISO VG460	460	414	506
ISO VG680	680	612	748
ISO VG1000	1000	900	1100
ISO VG1500	1500	1350	1650

4.4.4.- Combinación de los factores "a₂ y a₃"

Como los factores a₂ y a₃ son interdependientes, la mayoría de los fabricantes agrupan ambos factores en uno y sustituyen la fórmula de la vida ajustada por un factor combinado a₂₃ para el material y la lubricación, de esta manera la fórmula queda:

$$L_{na} = a_1 * a_{23} * L_{10}$$

4.5.- Fórmula de vida de acuerdo con la teoría de SKF.



Los trabajos realizados por Lundberg y Palmgren, en los cuales se basa la fórmula clásica de vida “ L_{10} ” normalizada por ISO, han sido ampliados por los fabricantes de rodamientos, para tener en cuenta la carga límite de fatiga y otra serie de factores relacionados con la contaminación y la lubricación.

La carga límite de fatiga “ P_u ” es un concepto nuevo que representa la carga por debajo de la cual no se produce fatiga en el rodamiento. El valor de P_u puede encontrarse en las tablas de rodamientos SKF.

A objeto de ofrecer una idea general sobre el alcance de la nueva teoría se ha elaborado una fórmula simplificada que muestra la relación entre la fórmula de vida ISO y la nueva fórmula propuesta por SKF:

$$L_{naa} = a_1 * a_{SKF} * L_{10}$$

Donde:

L_{naa} = Vida nominal ajustada según la teoría SKF en millones de revoluciones.

a_1 = Factor de ajuste por fiabilidad

a_{SKF} = Factor de ajuste basado en la teoría SKF

4.5.1.- Factor SKF.

Este factor representa una relación muy compleja entre una serie de otros factores que incluyen las condiciones de lubricación, y está relacionado con la razón de viscosidades κ . Los valores de a_{SKF} pueden determinarse a partir de una serie de diagramas en función de “ $\eta(P_u/P)$ ” para diferentes valores de κ . Estos diagramas, están basados en valores típicos de un factor de seguridad generalmente asociado a las cargas límite de fatiga de otros componentes mecánicos. El valor de este factor depende del tipo de rodamiento y los diagramas solo son válidos para lubricantes sin aditivos EP.



4.5.2.- Factor de ajuste η_c para la contaminación

Este factor ha sido introducido al objeto de tener en cuenta la contaminación en los aceites o grasas lubricantes. Su influencia en la vida del rodamiento antes de alcanzar el límite de fatiga depende de una serie de parámetros como el tamaño del rodamiento, el espesor relativo de la película de lubricante, el tamaño y la distribución de las partículas sólidas de contaminante (blando, duro) etc.

La influencia de estos parámetros en la vida de un rodamiento es compleja y muchos de ellos son difíciles de cuantificar, por tanto, no es fácil asignar valores precisos al parámetro η_c que puedan tener validez general. Sin embargo se puede utilizar la tabla siguiente como valores orientativos.

Valores del factor de ajuste η_c para diferentes grados de contaminación.

Condición ⁽¹⁾	η_c
Muy limpio Tamaño de partículas del orden del espesor de película del lubricante	1
Limpio Condiciones típicas de rodamientos con obturadores engrasados de por vida	0.8
Normal Condiciones típicas de rodamientos con protecciones engrasados de por vida	0.5
Contaminado Condiciones típicas de rodamientos sin obturaciones integradas; filtros de paso grueso para lubricante y/o entrada de partículas desde el entorno	0.5 a 0.1
Fuertemente contaminado ⁽²⁾	0

(1) La escala η_c se refiere sólo a contaminantes sólidos típicos. La disminución de vida del rodamiento por contaminación por agua u otros fluidos no está incluida.



(2) Para fuerte contaminación, los valores de η_c pueden estar fuera de la escala resultando una más severa reducción de la vida que la predicha por la ecuación L_{naa}

5.- Ejemplo de aplicación

Supongamos que queremos calcular la vida de un rodamiento rígido de bolas " 6309", con una fiabilidad del 90 %, fabricado con acero SKF estándar que gira a una velocidad de 5000 rpm bajo una carga cte $F_r = 8000$ N. La lubricación es por aceite con una viscosidad de $\nu=20$ mm²/s a la temperatura de funcionamiento.

Veamos la diferencia de utilizar las tres fórmulas de vida.

1°.- Vida nominal.

Para una fiabilidad del 90% se utiliza la norma ISO:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^n$$

Si buscamos en la tabla de rodamientos de SKF obtenemos:



Principal dimensions			Basic load ratings		Fatigue load limit	Speed ratings		Mass	Designation Selected bearing
d	D	B	dynamic C	static C ₀	P _u	Lubrication			
mm	mm	mm	N	N	N	grease	oil	kg	
40	52	7	4940	3450	186	11000	14000	0.03	SKF 61808 Y
40	62	12	13800	9300	425	10000	13000	0.12	SKF 61908
40	68	9	13300	9150	440	9500	12000	0.13	SKF 16008
40	68	15	16800	11600	490	9500	12000	0.19	SKF 6008
40	80	18	30700	19000	800	8500	10000	0.37	SKF 6208
40	80	18	35800	20800	880	8500	10000	0.34	SKF 6208 ETN9
40	90	23	41000	24000	1020	7500	9000	0.63	SKF 6308
40	110	27	63700	36500	1530	6700	8000	1.25	SKF 6408
45	58	7	6050	4300	228	9500	12000	0.04	SKF 61809 Y
45	68	12	14000	9800	465	9000	11000	0.14	SKF 61909
45	75	10	15600	10800	520	9000	11000	0.17	SKF 16009
45	75	16	20800	14600	640	9000	11000	0.25	SKF 6009
45	85	19	33200	21600	915	7500	9000	0.41	SKF 6209
45	100	25	52700	31500	1340	6700	8000	0.83	SKF 6309
45	120	29	76100	45000	1900	6000	7000	1.55	SKF 6409
50	65	7	6240	4750	250	9000	11000	0.05	SKF 61810 Y
50	72	12	14600	10400	500	8500	10000	0.14	SKF 61910

C = 52 700 N y como la carga es puramente radial P = F_r = 8000 N

$$L_{10} = \left(\frac{52700}{8000} \right)^3 = 286 \cdot \text{millones de revoluciones}$$

2º.- Vida ajustada L_{na}.

Utilizaremos ahora la fórmula de vida ajustada L_{na}

$$L_{na} = a_1 * a_{23} * \left(\frac{C}{P} \right)^n$$

Como la fiabilidad es del 90 % a₁ = 1

Para determinar el factor a₂₃ procederemos de la siguiente manera:

De la tabla de rodamientos, obtenemos el valor de d y D para calcular el d_m.

$$- d = 45 \quad D = 100 \quad \implies \quad d_m = 0.5 * (d+D) = 75.5$$



Entramos ahora en el diagrama n° 1 y obtenemos la viscosidad que debe tener el aceite a la temperatura de funcionamiento para una velocidad de 5000 rpm => $v_1 = 7 \text{ mm}^2/\text{s}$.

- De esta forma obtenemos el valor de $\kappa = v / v_1 = 2.9$
- Con este valor entramos en el diagrama n° 3 y obtenemos un factor $a_{23} = 2$.

Luego:

$$L_{na} = 1 * 2 * 286 = 572 \text{ millones de revoluciones}$$

3°.- Vida ajustada según SKF.

En este caso utilizaremos la siguiente expresión:

$$L_{naa} = a_1 * a_{SKF} * \left(\frac{C}{P}\right)^n$$

- Como la fiabilidad es del 90 % $a_1=1$

Si miramos de nuevo las tablas de rodamientos, obtenemos el valor de P_u para el rodamiento seleccionado "6309". $P_u = 1340 \text{ N}$. De esta forma obtenemos la relación: $P_u/P = 1340/8000 = 0.17$

Como las condiciones de limpieza son optimas $\eta_c = 1$, por lo tanto, $\kappa = 2.9$

Con este valor entramos en el diagrama n° 4 y obtenemos el valor de $a_{SKF} = 16$.

Luego:

$$L_{naa} = 1 * 16 * 286 = 4.576 \text{ millones de revoluciones}$$



Si queremos obtener el valor de vida en horas, multiplicaremos los resultados por el factor: $(1000000/(60*5000 \text{ rpm}))$

Resumiendo:

L_{10}	953 horas
L_{na}	1.907 horas
L_{naa}	15.250 horas

6.- Cálculo de cargas Dinámicas.

Las cargas que actúan en un rodamiento se calculan de acuerdo con las leyes de la mecánica siempre que se conozcan las fuerzas externas que actúan sobre el sistema.

Generalmente cuando se calculan las componentes sobre un rodamiento se suele considerar el eje como una viga apoyada sobre soportes rígidos y se desprecian los efectos de los momentos para simplificar los cálculos. Tampoco se suelen tener en cuenta las deformaciones elásticas del rodamiento, del soporte de la máquina ni los momentos producidos en el rodamiento por la flexión del eje. Estas simplificaciones son necesarias cuando se realizan cálculos sencillos y rápidos y donde la fiabilidad no es demasiado importante. Los métodos normalizados para el cálculo de las capacidades de carga y las cargas equivalentes se basan en suposiciones similares.

Se pueden determinar las cargas de un rodamiento en base a la teoría de la elasticidad sin necesidad de efectuar las simplificaciones anteriores, sin embargo para ello es necesario utilizar formulaciones más complejas y programas de ordenador más complicados.

Algunas de las fuerzas que actúan sobre el sistema se pueden conocer o calcular de forma simple, por ejemplo, el peso propio del eje, las fuerzas de inercia del conjunto, etc.



Sin embargo existen determinadas fuerzas que son de difíciles de predecir y por ello es necesario estimarlas en base a experiencias con otras máquinas similares.

6.1.- Carga dinámica equivalente.

Si la carga " F " que actúa sobre el rodamiento, calculada en base a la información anterior, cumple con las propiedades de la capacidad de carga dinámica " C ", es decir, es cte. en magnitud y dirección y actúa radialmente sobre un rodamiento radial o axialmente sobre uno axial, entonces : $F = C$, pudiendo introducirse " F " directamente en las ecuaciones de vida.

Sin embargo esto no suele ser así, por lo que es necesario calcular la carga dinámica equivalente sobre el rodamiento. Esta se define como:

"La carga hipotética constante en magnitud y dirección que si actuase radialmente sobre un rodamiento radial, o axialmente sobre uno axial, tendría el mismo efecto en duración del rodamiento que las cargas reales a las que está sometido dicho rodamiento."

Los rodamientos radiales con frecuencia están sometidos a cargas combinadas, tanto radiales como axiales simultáneamente. Si la magnitud y la dirección de las cargas resultantes son constantes, la carga dinámica equivalente se puede obtener de la siguiente ecuación:

$$P = X * F_r + Y * F_a$$

donde:

- P = carga dinámica equivalente en N
- F_r = Carga radial en N
- F_a = Carga axial en N
- X = Factor de carga radial del rodamiento
- Y = Factor de carga axial del rodamiento



En el caso de rodamientos radiales de una hilera de elementos rodantes, una carga axial adicional, solamente influye en la carga equivalente **P** si la relación F_a/F_r excede de un valor especificado "e" que viene definido en las tablas. Por el contrario para rodamientos radiales de dos hileras de elementos rodantes, incluso pequeñas cargas axiales influyen de un modo significativo

6.2.- Carga fluctuante.

En muchos casos la carga sobre un rodamiento suele ser variable con el tiempo. Para determinar la carga equivalente, se debe conocer primero una carga media constante "**F_m**" que produzca sobre el rodamiento el mismo efecto que una carga fluctuante real.

Cuando la carga variable se compone de diferentes fuerzas ctes. durante un cierto número de revoluciones, pero con magnitudes diferentes entre sí, la carga fluctuante se puede resolver en varias cargas individuales constantes y la carga media aproximada se obtiene de la expresión:

$$F_m = \sqrt[3]{\frac{F_1^3 * U_1 + F_2^3 * U_2 + F_3^3 * U_3 + \dots}{U}}$$

Donde:

- F_m = Carga media constante en Newton
- F_1, F_2, \dots = Cargas constantes durante U_1, U_2, \dots revoluciones en Newton
- U = Numero total de revoluciones ($U = U_1 + U_2 + \dots$) durante las cuales actúan las cargas F_1, F_2, \dots

Cuando la velocidad del rodamiento y la dirección de la carga son constantes pero la magnitud de la misma es variable entre un valor mínimo (F_{min}) y un valor máximo (F_{max}), la carga media se puede obtener de la ecuación :



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

Cuando la carga sobre el rodamiento está compuesta por una carga F_1 de magnitud y dirección constantes (por ejemplo, el peso de un rotor) y una carga rotativa constante F_2 (por ejemplo, la originada por el desequilibrio de este rotor), la carga media se puede obtener mediante la ecuación :

$$F_m = f_m (F_1 + F_2)$$

Los valores del factor f_m se pueden obtener tablas en los catálogos de los fabricantes de rodamientos

Si la carga variable actúa en cualquier dirección, primero se deben calcular las cargas medias F_m en cada dirección (radial y axial) y luego, reemplazar estos valores en la formula general:

$$P = X * F_{mr} + Y * F_{ma}$$

6.3.- Carga mínima requerida:

Para que un rodamiento pueda funcionar de modo satisfactorio, debe estar siempre sometido a una carga denominada **carga mínima**.

Una regla empírica general indica que sobre los rodamientos de rodillos se deben imponer cargas correspondientes a **0.002 C** y sobre los de bolas, cargas correspondientes a **0.01 C**. La importancia de someter los rodamientos a estas cargas mínimas se hace mayor cuando los rodamientos están sometidos a grandes aceleraciones o cuando giran a velocidades iguales o superiores al 75 % de la nominal indicada en las tablas.



7.- Selección del tamaño utilizando la capacidad de carga estática.

El tamaño del rodamiento deberá seleccionarse en base a su capacidad de carga estática C_o y no en base a su duración en los siguientes casos:

- Cuando los rodamientos funcionan en estacionario sometidos a cargas continuas o intermitentes (choques)
- Cuando el rodamiento efectúa lentos movimientos de oscilación bajo carga.
- Cuando el rodamiento gira bajo carga a velocidades muy bajas y solo se necesita alcanzar una vida corta
- Cuando el rodamiento gira y tiene que soportar elevadas cargas de choque durante una fracción de revolución, además de las cargas de trabajo normales.

En todos estos casos, la capacidad de carga del rodamiento no viene limitada por la fatiga del material, sino por la deformación permanente originada en los puntos de contacto entre los elementos rodantes y los caminos de rodadura.

Es necesario asegurar que no se produzcan deformaciones permanentes o bien que estas sean muy pequeñas para conseguir un correcto funcionamiento del sistema, para ello se debe seleccionar un rodamiento que tenga una capacidad de carga estática suficientemente elevada cuando la aplicación exija que el rodamiento cumpla con alguno de estos requisitos:

- Funcionamiento silencioso (motores eléctricos)
- Funcionamiento sin vibraciones (máquinas herramientas de precisión)
- Un par de rozamiento constante (equipos de medida)
- Bajo rozamiento en el arranque bajo carga (grúas)



Cuando el tamaño del rodamiento se determina en base a la capacidad de carga estática, se emplea un factor de seguridad " S_o " que representa la relación entre la capacidad de carga estática nominal C_o y la carga estática equivalente P_o .

7.1.- Carga estática equivalente

Cuando se tienen componentes radiales y axiales se deben convertir a una carga equivalente de forma similar a como se hacía en el caso de cargas dinámicas. Esta carga equivalente se define como:

"La carga (radial para rodamientos radiales y axial para los axiales) que si se aplicase produciría la misma deformación permanente en el rodamiento que las cargas que realmente se están aplicando"

Se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$P_o = X_o * F_r + Y_o * F_a$$

donde:

P_o = Carga estática equivalente en N

F_r = Carga radial en N

F_a = Carga axial en N

X_o = Factor de carga radial del rodamiento

Y_o = Factor de carga axial del rodamiento

Para calcular P_o se deberá utilizar la máxima carga a la cual pueda estar sometido el rodamiento e introducir sus componentes radial y axial en la ecuación.



7.2.- Capacidad de carga estática necesaria

La capacidad de carga estática necesaria C_o se determina mediante la ecuación:

$$C_o = S_o P_o$$

En la tabla adjunta se dan unos valores del factor de seguridad S_o orientativos, basados en la experiencia sobre rodamientos de bolas y rodillos para diversas aplicaciones y exigencias de rotación suave. A temperaturas elevadas la capacidad de carga estática del rodamiento disminuye.

Para los rodamientos cargados dinámicamente y que hayan sido seleccionados en base a duración, se aconseja comprobar si su capacidad de carga estática es la adecuada. Siempre que se conozca la carga estática equivalente P_o , se puede utilizar la siguiente fórmula:

$$S_o = C_o / P_o$$

Si el valor de S_o que se obtenga a partir de esta ecuación resultara inferior al valor recomendado en las tablas, se deberá seleccionar otro rodamiento que tenga una mayor capacidad de carga estática.

Valores orientativos del factor de seguridad estático S_o

Tipo de funcionamiento	Rodamientos giratorios						Rodamientos estacionarios	
	No silencioso		normal		muy silencioso			
	Rod. de bolas	Rod. De rodillos	Rod. de bolas	Rod. De rodillos	Rod. de bolas	Rod. De rodillos	Rod. de bolas	Rod. De rodillos
Suave sin vibraciones	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	>1.5	>2.5	>1.5	>3	>2	>4	>1	>4

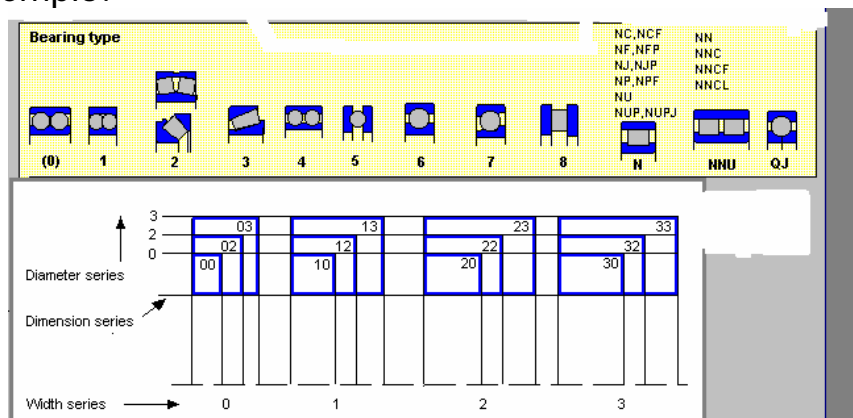
8.- Datos generales de los rodamientos.

8.1.- Dimensiones.

Tanto los fabricantes como los usuarios de rodamientos están interesados, por razones de costos, calidad, disponibilidad, etc, en limitar el número de tamaños de los rodamientos. Por ello ISO ha establecido un Plan de Dimensiones para los rodamientos de series métricas.

El Plan de Dimensiones incluye, para cada diámetro normalizado del agujero, varias series progresivas de diámetros exteriores normalizadas en orden creciente de tamaños. Para cada Serie de Diámetros, han sido establecidas distintas series de anchuras en orden creciente. La combinación de una serie de diámetros con una serie de anchuras se denomina Serie de Dimensiones. Cada serie de dimensiones se identifica por un número de dos cifras: la primera indica la Serie de anchuras y la segunda la serie de Diámetros.

Ejemplo:





8.2.- Tolerancias

La precisión en las dimensiones y exactitud de giro de los rodamientos han sido también normalizadas. Además de las tolerancias normales (clase de tolerancia 0), las normas ISO incluyen tolerancias más estrechas, por ejemplo las clases de tolerancia 5 y 6 para los rodamientos de husillos de máquinas herramientas.

8.3.-Nomenclatura:

A continuación se resume la nomenclatura utilizada en las tablas de rodamientos:

- d = Diámetro nominal del agujero
- D = Diámetro nominal exterior
- r_1, r_3 = Dimensión de chaflanes en dirección radial
- r_2, r_4 = Dimensión de chaflanes en dirección axial
- $r_{S \min}$ = Símbolo general para el límite mínimo de r_1, r_2, r_3, r_4

8.4.-Juego interno.

El juego interno de un rodamiento es la distancia total que puede desplazarse uno de sus aros en relación al otro en dirección radial (juego radial) o en dirección axial (juego axial).

Hay que distinguir entre el juego interno antes y después del montaje y una vez que alcance la temperatura de funcionamiento (juego de funcionamiento).

El juego interno inicial (antes de montaje) es superior al juego en funcionamiento debido a los diferentes grados de interferencia en los ajustes y a la dilatación térmica del propio rodamiento y los elementos asociados que dan lugar a una expansión o contracción de los aros.

El juego interno de un rodamiento es de vital importancia para que pueda funcionar de forma correcta. Como regla general, en los



rodamientos de bolas el juego debe ser casi nulo o incluso suele convenir una pequeña precarga.

8.5.- Materiales usados para los rodamientos.

El rendimiento y la fiabilidad de los rodamientos viene dado en gran medida por los materiales con los cuales se fabrican.

■ 8.5.1.- Aceros para los aros y elementos rodantes:

Los aceros utilizados para la fabricación de los rodamientos deben tener un temple adecuado y una alta resistencia a la fatiga y al desgaste.

- Aceros de temple total

El acero de temple total es el más comúnmente usado para los rodamientos. Es un acero al cromo que contiene un 1 % de carbono y un 1.5 % de cromo.

- Aceros de cementación.

Los aceros aleados al cromo-níquel y al cromo-manganeso con un contenido en carbono de alrededor del 0.15 % son los aceros de cementación más comúnmente utilizados.

- Aceros resistentes a la corrosión.

Para las aplicaciones que funcionan en contacto con medios corrosivos, se utilizan aceros inoxidable al cromo o al cromo-molibdeno. Debido a la menor dureza de estos aceros, los rodamientos no tienen tanta capacidad de carga como los fabricados con acero convencional.



8.5.2.-Materiales para las jaulas.

La finalidad de las jaulas es la de mantener separados los elementos rodantes, a una distancia adecuada para evitar el contacto entre los elementos rodantes vecinos, al objeto de mantener al mínimo el rozamiento y con ello la generación de calor. Las jaulas están mecánicamente sometidas a tensiones debidas a fuerzas de rozamiento, de tracción - compresión y de inercia y también pueden estar sometidas a la acción química de ciertos lubricantes. Los materiales más empleados son la poliamida, el acero y el latón.

9.- Disposición de los rodamientos.

Generalmente se precisan dos rodamientos para soportar un eje (excepto cuando se trate de una disposición en voladizo) y para situarlos tanto axial como radialmente con relación a la parte estacionaria de la máquina. Uno de los rodamientos debe ser fijo y el otro libre.

El rodamiento fijo en uno de los extremos del eje proporciona soporte radial y al mismo tiempo, fija axialmente en ambos sentidos, por lo que debe quedar sujeto lateralmente en el eje y en el alojamiento. Los rodamientos radiales que soportan cargas combinadas son adecuados para emplearlos como rodamientos fijos, por ejemplo, los rodamientos de bolas.

El rodamiento libre en el otro extremo proporciona soporte radial y para evitar que se produzcan tensiones reciprocas entre los rodamientos debe permitirse desplazamientos axiales.

El termino "**fijación cruzada**" se emplea para describir aquellas disposiciones en las que cada uno de los rodamientos fija el eje axialmente en un solo sentido siendo los sentidos opuestos. Esta disposición se usa principalmente para ejes cortos. Se suelen utilizar con rodamientos de bolas de contacto angular y los de rodillos cónicos.



9.1.- Fijación Radial.

Para poder aprovechar al máximo la capacidad de carga de un rodamiento, sus aros deben quedar apoyados en toda su superficie. Este apoyo debe ser firme y uniforme, y se puede conseguir mediante asientos cilíndricos o cónicos, por ello los asientos deben hacerse con la precisión adecuada y con la superficie no interrumpida por ranura, agujeros, ni ninguna otra irregularidad, además, los aros deben quedar montados de una manera fiable para evitar que giren en sus asientos bajo la aplicación de la carga.

Normalmente la mejor manera de conseguir una fijación satisfactoria es mediante el montaje con un cierto grado de interferencia. Sin embargo de esta forma se empeora la facilidad de montaje y desmontaje, o cuando se necesita que el rodamiento tenga libertad de movimiento axial. A la hora de seleccionar el ajuste hay que tener en cuenta los siguientes factores:

- **Condiciones de giro.** Se refiere al movimiento de los aros respecto de la dirección de la carga. Se pueden presentar tres casos:
 - **Carga rotativa.** Cuando el aro del rodamiento gira y la carga es fija, o bien cuando el aro es estacionario y es la carga la que gira, de modo que todos los puntos del camino de rodadura están sometidos a carga en el curso de una revolución. En este caso se deben utilizar ajustes por **interferencia** para evitar que el aro gire en su alojamiento
 - **Carga fija.** Cuando el aro permanece estacionario y la carga también, o bien cuando el aro y la carga giran a la misma velocidad de forma que la carga está siempre dirigida hacia el mismo punto. En este caso no es necesario utilizar interferencia en el montaje.
 - **Carga de dirección indeterminada.** Cuando las cargas son variables en dirección. En estos casos es deseable que ambos aros estén montados con interferencia.



9.1.1.- Magnitud de la carga.

La carga sobre el aro interior hace que el mismo se expanda, con lo que se afloja su ajuste de interferencia, y bajo la influencia de una carga rotativa puede producirse el giro del aro en el asiento. El grado de interferencia entre el aro y su alojamiento debe estar en relación con la magnitud de la carga.

9.1.2.- Juego interno del rodamiento.

Un ajuste de apriete de un rodamiento con el eje o con el alojamiento produce una deformación elástica de los aros, por lo cual se reduce el juego interno. Dado que es necesario un cierto juego para el correcto funcionamiento puede que se necesite montar rodamientos con un juego interno mayor al Normal.

9.1.3.- Condiciones de Temperatura

Los aros del rodamiento, en servicio, alcanzan normalmente temperaturas superiores a las de los ejes y alojamientos. Esto puede causar que se afloje el ajuste de los aros. Por lo tanto al seleccionar el ajuste, se debe tener en cuenta la temperatura de funcionamiento y las dilataciones de los elementos

9.1.4.- Facilidad de montaje y desmontaje.

Para muchas aplicaciones es necesario facilitar el montaje y desmontaje de los rodamientos, por lo que los ajustes se hacen con poca interferencia



9.2.- Fijación Axial.

Una ajuste de apriete, por si solo, generalmente no es suficiente para realizar la fijación axial del aro de un rodamiento. Por lo tanto se necesita un medio adecuado para la fijación axial segura del aro.

Los dos aros de los rodamientos fijos se deben sujetar axialmente por ambas caras. Cuando se utilizan rodamientos libres del tipo no desarmable, basta con fijar en sentido axial el aro que tiene el ajuste más fuerte (generalmente el interior) debiendo quedar el otro libre para moverse. Los rodamientos con fijación cruzada solo requieren que se fijen axialmente los aros por uno de los lados.

9.3.- Precarga de Rodamientos.

Cada disposición de rodamientos requiere una holgura de funcionamiento positiva o negativa, según la aplicación. En la mayoría de los casos la holgura, aunque pequeña, debe existir (juego interno) para un correcto funcionamiento del mismo. Sin embargo, en algunos casos es necesario introducir una precarga con objeto de aumentar la rigidez del conjunto o incrementar la exactitud de giro.

Tal es el caso de los husillos de las máquinas-herramientas, de los rodamientos del piñón de ataque de las transmisiones de vehículos a motor etc. También se suelen aplicar pequeñas precargas cuando los rodamientos trabajan con una carga muy pequeña, o incluso nula y deben girar a muy alta velocidad, con objeto de asegurar una carga mínima de trabajo.



9.3.1.- Tipos de precarga.

La precarga puede ser axial o radial, depende del tipo de rodamiento, así por ejemplo los rodamientos de rodillos cilíndricos sólo se pueden precargar radialmente, mientras que los axiales de bolas sólo pueden precargarse axialmente. Los rodamientos de rodillos cónicos y los de una hilera de bolas de contacto angular, que generalmente se montan con un segundo rodamiento en dos tipos de disposiciones: espalda con espalda (montaje en O) o cara a cara (montaje en X), se precargan axialmente. Esta precarga axial supone una cierta precarga radial.

Dado que la distancia entre centros de presión (que se denomina L) es mayor cuando la disposición es espalda con espalda, esta disposición es capaz de soportar mayores cargas de par, aunque la distancia entre los centros de los rodamientos sea pequeña.

Las fuerzas radiales resultantes del par y la deformación causada por estas fuerzas son menores cuando los rodamientos se disponen cara a cara.

La disposición espalda con espalda también es beneficiosa cuando se necesita que las cargas tanto axiales como radiales producidas por las dilataciones térmicas se anulen mutuamente en ambos rodamientos evitando así variaciones en la precarga de los mismos

9.3.2.- Efectos de la precarga en el rodamiento.

Los principales efectos de la precarga en los rodamientos son:
Mayor rigidez. Las deformaciones elásticas provocadas por la carga dentro de una gama de valores dada son más pequeñas en los rodamientos precargados.

Funcionamiento silencioso. Cuanto más pequeña es la holgura en funcionamiento de un rodamiento, mejor son los guiados de los elementos rodantes en la zona sin carga y más silencioso es el funcionamiento.



Precisión en el guiado del eje. Un eje sobre rodamientos precargados es guiado con mayor precisión debido a que la precarga reduce la flexión del eje bajo la acción de la carga. Como consecuencia, se consigue un funcionamiento silencioso y se prolonga la duración de los engranajes

Mejora del desgaste. El desgaste y el asentamiento de un rodamiento mejoran cuando se introduce un precarga que elimina las holguras de funcionamiento.

Mayor vida en servicio. La precarga de los rodamientos implica una mayor fiabilidad de funcionamiento y una mayor duración de la aplicación. La precarga correctamente dimensionada puede tener una influencia favorable en la distribución de la carga sobre los rodamientos y por lo tanto prolongar también su duración.