



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica

**PRINCIPIOS PARA LA CORRECTA SELECCIÓN Y  
APLICACIÓN DE LOS DIFERENTES TIPOS DE RODAMIENTOS**

**José Luis Argueta Fernández**

Asesorado por el Ing. Mecánico Julio César Campos Paiz

Guatemala, octubre de 2009



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PRINCIPIOS PARA LA CORRECTA SELECCIÓN Y  
APLICACIÓN DE LOS DIFERENTES TIPOS DE RODAMIENTOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

**JOSÉ LUIS ARGUETA FERNÁNDEZ**

ASESORADO POR EL ING. MECÁNICO JULIO CÉSAR CAMPOS PAIZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO MECÁNICO**

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2009



**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Angel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. José Milton De León Bran
VOCAL V	Br. Isaac Sultán Mejía
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXÁMEN GENERAL PRIVADO**


DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma
EXAMINADOR	Ing. Roberto Guzmán Ortiz
EXAMINADOR	Ing. Sergio Torres Hernández
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

**HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**PRINCIPIOS PARA LA CORRECTA SELECCIÓN Y  
APLICACIÓN DE LOS DIFERENTES TIPOS DE RODAMIENTOS,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 23 de septiembre de 2009

A handwritten signature in black ink, consisting of several overlapping, fluid strokes that form a complex, somewhat abstract shape. The signature is positioned above the printed name.

José Luis Argueta Fernández

Guatemala, 09 de octubre de 2009


Señor:  
Ing. Julio César Campos Paiz  
Director de Escuela de Ingeniería Mecánica  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Señor Director:

Al saludarle me dirijo a usted para informarle que he tenido a bien asesorar el trabajo de graduación titulado: "PRINCIPIOS PARA LA CORRECTA SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE LOS DIFERENTES TIPOS DE RODAMIENTOS", desarrollado por el estudiante **José Luis Argueta Fernández**, y encontrándolo satisfactorio en su contenido y resultados, me permito dar aprobación al mismo sugiriendo el tramite pertinente, en el entendido que el autor y asesor somos responsables del contenido y conclusiones del trabajo.

Sin otro particular me suscribo.

Atentamente,

  
Ing. Julio César Campos Paiz  
Colegiado 2701

*Julio César Campos Paiz*  
Ingeniero Mecánico  
Colegiado 2701


UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA




FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

El Coordinador del Área de Diseño de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado PRINCIPIOS PARA LA CORRECTA SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE LOS DIFERENTES TIPOS DE RODAMIENTOS, del estudiante José Luis Argueta Fernández, recomienda su aprobación.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

  
Ing. Alvaro Antonio Avila Pinzón  
Coordinador de Área



Guatemala, octubre de 2009.

/s/ del



**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA**

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, después de conocer el dictamen del asesor, con la aprobación del Coordinador del Área de Diseño, al Trabajo de Graduación titulado PRINCIPIOS PARA LA CORRECTA SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE LOS DIFERENTES TIPOS DE RODAMIENTOS, del estudiante José Luis Argueta Fernández, procede a la autorización del mismo.

**ID Y ENSEÑAD A TODOS**

Ing. Julio César Campos Paiz  
**DIRECTOR**



Guatemala, octubre de 2009

JCCP/belndei



Ref. DTG.441.2009

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al trabajo de graduación titulado: **PRINCIPIOS PARA LA CORRECTA SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE LOS DIFERENTES TIPOS DE RODAMIENTOS**, presentado por el estudiante universitario **José Luis Argueta Fernández**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos  
DECANO



Guatemala, octubre de 2009

/cc

## **DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS A:**

### **DIOS**

Por estar siempre a mi lado, por ser luz, apoyo y fortaleza en todo mi camino, porque nada es imposible para Él, gracias por todo.

### **MIS PADRES**

Miguel Ángel Argueta y Olga Mirtala Fernández de Argueta, por su amor, consejos, comprensión y paciencia incondicional desde el día en que nací, hasta la fecha.

### **MIS HERMANOS**

Miguel Ángel e Ivi Yesenia, gracias por sus palabras de aliento en los momentos más difíciles.

### **MI AMADA ESPOSA**

Mayra Marlene Álvarez de Argueta, gracias por ser mi compañera idónea, te amo bebé.

### **MI ALMA MATER**

Universidad de San Carlos de Guatemala, porque en ella me forje como profesional y me dio las herramientas para enfrentarme a la vida.

### **MIS AMIGOS**

No los menciono por nombre por temor a olvidar alguno, todos han sido y serán importantes para mí, así es que gracias a todos por su lealtad, cariño y amistad.



## ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b>	XI
<b>GLOSARIO</b>	XV
<b>RESUMEN</b>	XVII
<b>OBJETIVOS</b>	XIX
<b>INTRODUCCIÓN</b>	XXI
<b>1. SELECCIÓN DEL TIPO DE RODAMIENTO</b>	
1.1 Selección del tipo de rodamiento	1
1.2 Espacio disponible	2
1.3 Cargas	5
1.3.1 Magnitud de la carga	5
1.3.2 Sentido de la carga	5
1.4 Desalineación	9
1.5 Precisión	10
1.6 Velocidad	10
1.7 Funcionamiento silencioso	11
1.8 Rigidez	11
1.9 Desplazamiento axial	11
1.10 Montaje y desmontaje	12
1.10.1 Agujero cilíndrico	12
1.10.2 Agujero cónico	13
<b>2. SELECCIÓN DEL TAMAÑO DEL RODAMIENTO</b>	
2.1 Selección del tamaño del rodamiento	15
2.2 Teoría sobre la vida y fiabilidad de los rodamientos	15

2.3	Capacidad de carga y vida	16
2.3.1	Cargas dinámicas y vida	17
2.3.2	Cargas estáticas	18
2.4	Selección del tamaño del rodamiento utilizando las formulas de vida	20
2.4.1	Vida nominal	20
2.4.2	Condiciones de lubricación – relación de viscosidad k	21
2.4.2.1	Ejemplo de cálculo	21
2.4.3	Consideración de los aditivos EP	24
2.4.4	Factor $\eta_c$ para el nivel de contaminación	24
2.4.5	Cálculo de vida con condiciones de funcionamiento variables	25
2.4.6	Influencia de la temperatura de funcionamiento	27
2.4.7	Vida nominal requerida	28
2.5	Cargas dinámicas del rodamiento	29
2.5.1	Cálculo de las cargas dinámicas del rodamiento	29
2.5.2	Carga dinámica equivalente del rodamiento	30
2.5.3	Cálculo de las cargas dinámicas del rodamiento en trenes de engranajes y transmisiones por correa	32
2.6	Selección del tamaño del rodamiento utilizando la capacidad de carga estática	33
2.6.1	Selección del tamaño del rodamiento utilizando la capacidad de carga estática	33
2.6.2	Carga estática equivalente	35
2.6.3	Capacidad de carga estática requerida	36
2.6.4	Comprobación de la capacidad de carga estática	37
<b>3.</b>	<b>FRICCIÓN EN LOS RODAMIENTOS</b>	
3.1	Fricción	39

3.2	Estimación del momento de fricción	39
3.3	Cálculo mas preciso del momento de fricción	40
3.4	Nuevo modelo para el cálculo del momento de fricción	41
3.4.1	Momento de fricción por rodadura	42
3.4.2	Momento de fricción por deslizamiento	43
3.4.3	Momento de fricción de las obturaciones	44
3.4.4	Efectos adicionales sobre los momentos de fricción de los rodamientos.	45
3.4.5	Factor de reducción por calentamiento del lubricante en la entrada, entre el camino de rodadura y los elementos rodantes	47
3.4.6	Factor de reducción por abastecimiento cinemática	49
3.4.7	Pérdidas de energía por la agitación del aceite en lubricación con baño de aceite	51
3.4.8	Lubricación mixta para bajas velocidades y viscosidades	55
3.4.9	Efectos del juego y la desalineación en la fricción	56
3.4.10	Efectos del llenado de grasa en la fricción	57
3.5	Par de arranque	57
3.6	Pérdida de potencia y temperatura del rodamiento	58
<b>4.</b>	<b>VELOCIDADES Y VIBRACIONES EN LOS RODAMIENTOS</b>	
4.1	Velocidades y vibración	59
4.2	Velocidades de referencia	59
4.2.1	Influencia de la carga y de la viscosidad del aceite en la velocidad de referencia/velocidad permisible	61
4.2.2	Velocidades superiores a la velocidad de referencia	65
4.3	Velocidades límite	65
4.4	Casos especiales	67
4.4.1	Velocidades bajas	67

4.4.2	Movimientos oscilantes	67
4.5	Generación de vibraciones en un rodamiento	68
4.5.1	Agitación debido a la variación del número de elementos rodantes cargados	68
4.5.2	Precisión de los componentes adyacentes	68
4.5.3	Daño local	69
4.5.4	Contaminantes	69
4.6	Influencia del rodamiento sobre la vibración	69
<b>5.</b>	<b>DATOS GENERALES DE LOS RODAMIENTOS</b>	
5.1	Dimensiones	71
5.1.1	Planes generales de la ISO	71
5.1.2	Planes generales para rodamientos en pulgadas	73
5.1.3	Dimensiones de los chaflanes	74
5.2	Tolerancias	75
5.2.1	Símbolos de tolerancias	75
5.2.2	Identificación de las series de diámetros	77
5.2.3	Tablas de tolerancias	79
5.2.4	Límites para las dimensiones de los chaflanes	82
5.3	Juego interno del rodamiento	85
5.4	Materiales usados para los rodamientos	87
5.4.1	Materiales usados para los aros y elementos rodantes de los rodamientos	88
5.4.1.1	Aceros de temple total	88
5.4.1.2	Aceros templados por corrientes de inducción	88
5.4.1.3	Aceros de cementación	89
5.4.1.4	Aceros inoxidable	89
5.4.1.5	Aceros para rodamientos resistentes a las altas temperaturas	89



5.4.2	Materiales para las jaulas	90
5.4.2.1	Jaulas de chapa de acero	90
5.4.2.2	Jaulas mecanizadas en acero	90
5.4.2.3	Jaulas en chapa de latón	91
5.4.2.4	Jaulas mecanizadas en latón	91
5.4.2.5	Jaulas de polímero	91
5.4.2.6	Jaulas de polieter-éter-cetona (PEEK)	92
5.4.2.7	Jaulas de resina fenolica	92
5.4.3	Materiales para las obturaciones	92
5.4.3.1	Caucho nitrilo	93
5.4.3.2	Caucho nitrilo hidrogenado	93
5.4.3.3	Poliuretano	94
5.4.3.4	Caucho fluorado	94
5.4.4	Medidas de seguridad para el caucho fluorado	95
5.4.5	Recubrimientos	96
5.5	Jaulas	96
5.5.1	Jaulas embutidas	97
5.5.2	Jaulas macizas	98
5.5.3	Jaulas con pasadores	100
5.6	Designaciones	100
5.6.1	Designaciones básicas	101
5.6.2	Designaciones complementarias	105
5.6.2.1	Prefijos	105
5.6.2.2	Sufijos	105

## **6. APLICACIÓN DE LOS RODAMIENTOS**

6.1	Aplicación de los rodamientos	107
6.1.1	Disposiciones de rodamientos fijos y libres	107
6.1.2	Disposiciones de rodamientos apareados	108

6.1.3	Disposiciones de rodamientos “libres”	109
6.2	Fijación radial de rodamientos	110
6.2.1	Selección del ajuste	111
6.2.1.1	Condiciones de giro	111
6.2.1.2	Magnitud de la carga	112
6.2.1.3	Juego interno del rodamiento	113
6.2.1.4	Temperatura	113
6.2.2	Ajustes recomendados	114
6.2.3	Ajustes para ejes huecos	114
6.2.4	Precisión dimensional, de forma y giro de asientos y resaltes para rodamientos	115
6.2.4.1	Tolerancias dimensionales	116
6.2.4.2	Tolerancias para forma cilíndrica	117
6.2.4.3	Tolerancias de asientos en ejes cónicos	118
6.2.5	Rugosidad superficial de los asientos de los rodamientos	120
6.2.6	Camino de rodadura en ejes y alojamientos	120
6.3	Fijación axial de rodamientos	121
6.3.1	Métodos de fijación	121
6.3.1.1	Rodamientos con agujero cilíndrico	121
6.3.2	Acuerdos y resaltes	122
6.4	Diseño de los componentes adyacentes	124
6.5	Precarga de los rodamientos	124
6.5.1	Tipos de precarga	125
6.5.2	Efectos de la precarga en el rodamiento	127
6.5.2.1	Mayor rigidez	127
6.5.2.2	Funcionamiento silencioso	128
6.5.2.3	Precisión en el guiado del eje	128
6.5.2.4	Compensación del desgaste y el asentamiento	128

6.5.2.5	Mayor vida útil	128
6.5.3	Determinación de la fuerza de la precarga	129
6.5.4	Procedimientos de ajuste	131
6.5.4.1	Ajuste individual	131
6.5.4.2	Ajuste usando la trayectoria de la precarga	132
6.5.4.3	Ajuste colectivo	133
6.5.5	Precarga mediante muelles	133
6.5.6	Mantenimiento de la precarga adecuada	134
6.5.7	Rodamientos para disposiciones de rodamientos precargados	135
6.6	Disposiciones de obturaciones	135
6.6.1	Tipos de obturaciones	136
6.6.2	Selección del tipo de obturación	138
6.6.3	Obturaciones integrales	139
6.6.3.1	Rodamientos con placas de protección	139
6.6.3.2	Rodamientos con obturaciones rozantes	140
6.6.4	Obturaciones externas	141
6.6.4.1	Obturaciones no rozantes	141
6.6.4.2	Obturaciones rozantes	142
<b>7.</b>	<b>LUBRICACIÓN DE LOS RODAMIENTOS</b>	
7.1	Lubricación	143
7.2	Lubricación con grasa	143
7.3	Grasas lubricantes	144
7.3.1	Viscosidad de aceite base	145
7.3.2	Consistencia	145
7.3.3	Margen de temperaturas – el concepto de semáforo	146
7.3.4	Protección contra la corrosión, comportamiento en presencia de agua.	149

7.3.5	Capacidad de carga, aditivos EP y AW	150
7.3.6	Miscibilidad	151
7.4	Relubricación	152
7.4.1	Intervalos de relubricación	153
7.4.2	Ajustes de los intervalos de relubricación debido a las condiciones de funcionamiento y tipos de rodamientos	155
7.4.2.1	Temperatura de funcionamiento	155
7.4.2.2	Vibración	156
7.4.2.3	Contaminación	156
7.4.2.4	Desalineación	156
7.4.3	Observaciones	157
7.5	Procedimientos para relubricación	157
7.5.1	Reposición	158
7.5.2	Renovación del llenado de grasa	159
7.5.3	Relubricación continua	160
7.6	Lubricación con aceite	161
7.6.1	Métodos de lubricación con aceite	161
7.6.1.1	Baño de aceite	161
7.6.1.2	Anillo de lubricación	162
7.6.1.3	Circulación de aceite	162
7.6.1.4	Chorro de aceite	163
7.6.1.5	Niebla de aceite	164
7.6.2	Aceites lubricantes	164
7.6.3	Selección del aceite lubricante	165
7.6.4	Cambio de aceite	166

## **8. MONTAJE Y DESMONTAJE DE LOS RODAMIENTOS**

8.1	Información general	167
8.1.1	Donde realizar el montaje	167

8.1.2	Preparación para el montaje y el desmontaje	168
8.1.3	Manipulación de los rodamientos	168
8.2	Montaje	170
8.2.1	Montaje de rodamientos con un agujero cilíndrico	170
8.2.1.1	Montaje en frío	170
8.2.1.2	Montaje en caliente	171
8.2.2	Ajuste de los rodamientos	172
8.2.3	Montaje de los rodamientos con un agujero cónico	172
8.2.3.1	Rodamientos pequeños	173
8.2.3.2	Rodamientos medianos y grandes	173
8.2.3.3	Determinación del ajuste de interferencia	174
8.2.4	Prueba de funcionamiento	175
8.3	Desmontaje	176
8.3.1	Desmontaje de rodamientos con un agujero cilíndrico	176
8.3.1.1	Desmontaje en frío	176
8.3.1.2	Desmontaje en caliente	177
8.3.2	Desmontaje de rodamientos con un agujero cónico	178
8.3.2.1	Desmontaje de rodamientos sobre ejes cónicos	178
8.3.2.1	Desmontaje de rodamientos sobre un manguito de fijación	179
8.4	Almacenamiento de los rodamientos	180
8.5	Inspección y limpieza	181
	<b>CONCLUSIONES</b>	183
	<b>RECOMENDACIONES</b>	185
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	187



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

- 1 Rodamientos de bolas y de agujas
- 2 Rodamientos de agujas con y sin aro interior
- 3 Rodamientos de agujas combinados
- 4 Coronas axiales de agujas con y sin arandelas
- 5 Rodamientos de bolas de cuatro puntos de contacto
- 6 Rodamientos de una y dos hileras de bolas y rodamientos de rodillos a rótula
- 7 Rodamiento de bolas de cuatro puntos de contacto
- 8 Diferentes tipos de rodamiento con agujero cónico
- 9 Vida del rodamiento
- 10 Estimación de viscosidad cinemática
- 11 Curva de predicción de vida de un rodamiento bajo cargas variables
- 12 Componentes de carga radiales y axiales
- 13 Flujo inverso de lubricante en la entrada de los contactos
- 14 Factor de calentamiento del lubricante en el borde de entrada entre el camino de rodadura y los elementos rodantes  $\Phi_{ish}$
- 15 Fórmula de factor de reducción por reabastecimiento cinemática
- 16 Nivel de aceite H en un baño de aceite
- 17 Variable de pérdida de energía por agitación del aceite  $V_M$
- 18 Ecuación para la constante relacionada con los rodamientos de bolas
- 19 Ecuación para la constante relacionada con los rodamientos de rodillos
- 20 Momento de fricción del rodamiento como función de la velocidad y la viscosidad

- 21 Factores de ajuste  $f_p$  y  $f_v$  para los rodamientos de bolas
- 22 Factores de ajuste  $f_p$  y  $f_v$  para los rodamientos axiales de rodillos
- 23 Relación altura-anchura según las series de los rodamientos
- 24 Combinación de series de ángulos con series de diámetros y anchuras
- 25 Valores mínimos para las dimensiones de los chaflanes
- 26 Radios correspondientes para los límites de los chaflanes
- 27 Juego radial y axial interno de un rodamiento
- 28 Tipos de jaula embutida
- 29 Tipos de jaulas macizas
- 30 Otros tipos de jaulas
- 31 Sistema de designación para los rodamientos de bolas y rodillos estándar
- 32 Disposición de rodamiento rígido de bolas / rodamiento de rodillos cilíndricos
- 33 Disposición de rodamientos de bolas con contacto angular y de rodillos cónicos
- 34 Disposición de rodamientos rígidos de bolas
- 35 Desviación permisible para la inclinación del cono
- 36 Rodamientos axiales fijados con anillo elástico y con tuerca de fijación
- 37 Disposición de los acuerdos con chaflanes
- 38 Rodamiento montado con un segundo del mismo tipo
- 39 Dirección de las fuerzas de precarga en los rodamientos
- 40 Anillo tórico
- 41 Obturación radial de eje
- 42 Obturaciones rozantes estándar
- 43 El concepto de semáforo para las grasas lubricantes
- 44 Intervalos de relubricación a temperaturas de funcionamiento de 70°C
- 45 Reposición de grasa por el lateral y por la ranura anular
- 46 Lubricación por circulación de aceite
- 47 Forma correcta de elevar rodamientos grandes y/o pesados



- 48 Montaje de un rodamiento con agujero cónico utilizando una tuerca hidráulica e inyección de aceite
- 49 Desmontaje de rodamientos utilizando extractor, tornillos de desmontaje e inyección de aceite
- 50 Aro de desmontaje térmico o aro de calentamiento
- 51 Desmontaje de rodamientos con agujero cónico utilizando un martillo

## TABLAS

- I Clasificación de viscosidad según la ISO 3448
- II Valores orientativos para el factor  $\eta_c$  para distintos niveles de contaminación
- III Valores orientativos de una vida nominal requeridos para diferentes clases de máquinas
- IV Valores orientativos para el factor de seguridad estático  $s_0$
- V Coeficiente de fricción constante  $\mu$  para rodamientos sin obturaciones
- VI Momento de fricción de las obturaciones, exponente y constantes
- VII Constantes geométricas  $K_z$  y  $K_L$
- VIII Símbolos de tolerancias
- IX Series de diámetros para rodamientos radiales
- X Tolerancias normales para rodamientos radiales
- XI Tolerancias para rodamientos de rodillos cónicos y métricos
- XII Tolerancias para rodamientos de rodillos cónicos en pulgadas
- XIII Límites de dimensiones de chaflanes para rodamientos radiales y axiales, excepto los de rodillos cónicos
- XIV Límites de dimensiones de chaflanes para rodamientos radiales de rodillos cónicos

- XV Designación complementaria para el juego interno
- XVI Códigos para la designación de los rodamientos
- XVII Tolerancias del eje para rodamientos montados sobre manguitos
- XVIII Grados de tolerancia ISO para dimensiones
- XIX Dimensiones adecuadas para los acuerdos de los chaflanes

## GLOSARIO

<b>Carga axial</b>	Es aquella que aparece como resultante de un sistema de cargas, misma que transcurre por el eje centroidal de la sección del elemento cargado, ya sea en tensión o compresión.
<b>Carga radial</b>	Es la carga que aparece como resultante de un sistema de cargas, misma que transcurre perpendicular al eje de rotación.
<b>Fricción</b>	Es la fuerza de rozamiento entre dos superficies en contacto, que se opone al movimiento de una superficie sobre la otra o la fuerza que se opone al inicio del movimiento.
<b>Grasa</b>	Es un producto que va desde sólido a semilíquido y es producto de la dispersión de un aceite espesante y un líquido lubricante que le dan sus propiedades básicas, generalmente son aceites que contienen jabones como agentes que le dan cuerpo.
<b>Lubricación</b>	Estudio de los medios utilizados para reducción de la fricción entre dos superficies con movimiento relativo, de su comportamiento del entorno y de sus consecuencias.

<b>Lubricante</b>	Es una sustancia que colocada entre dos piezas móviles no se degrada, y forma asimismo una película que impide su contacto directo, aun a altas presiones y temperaturas.
<b>Mantenimiento</b>	Son todas las acciones que tienen por objeto mantener un artículo en un estado en el cual pueda llevar a cabo alguna función requerida.
<b>Par de arranque</b>	En los rodamientos se define como el momento de fricción que debe vencer el rodamiento para poder empezar a girar partiendo de un estado estacionario.
<b>Rigidez</b>	Es la capacidad de un objeto sólido o elemento estructural para soportar esfuerzos sin adquirir grandes deformaciones o desplazamientos.
<b>Rodamiento</b>	También denominado cojinete, es un elemento mecánico que reduce la fricción entre un eje y las piezas conectadas a éste, que le sirve de apoyo y facilita su desplazamiento.
<b>Velocidad</b>	Es una magnitud física de carácter vectorial que expresa el desplazamiento de un objeto por unidad de tiempo y se expresa en metros por segundo (m/s) en el sistema internacional de unidades.
<b>Vibración</b>	Es la oscilación o el movimiento repetitivo de un objeto alrededor de una posición de equilibrio.

## RESUMEN

El siguiente trabajo de graduación tiene como objetivo fundamental dar a conocer los principios para la correcta selección y aplicación de los diferentes tipos de rodamientos, y así lograr el óptimo desempeño de la maquinaria en la cual serán instalados.

Para poder aplicar estos principios previamente, debemos conocer las fuerzas físicas a las cuales estarán sometidos dichos elementos de máquina durante su funcionamiento. Entre estas fuerzas podemos mencionar las tres que se consideran más importantes:

- Las cargas radiales o axiales
- Las velocidades límites
- El momento de fricción

Entre los factores que debemos tomar muy en cuenta para la correcta selección de un rodamiento encontramos el espacio disponible para el montaje del mismo, la precisión que buscamos en el rodamiento, las tolerancias, el juego interno, el tipo de material de construcción y varios factores más que se describen en el contenido de este trabajo.

También se considera muy importante el montaje y desmontaje de los rodamientos, ya que de una correcta instalación depende intrínsecamente la vida y el desempeño del mismo.

Además del montaje y desmontaje también se dan a conocer las técnicas de mantenimiento que se deben aplicar, los períodos de lubricación y los diferentes tipos de grasas que se pueden utilizar para realizar estos últimos y así alcanzar la totalidad de la vida útil del rodamiento.

Por último tenemos el almacenamiento de los rodamientos y las inspecciones periódicas que se deben realizar para evitar cualquier contratiempo en el funcionamiento de la maquinaria en la cual se encuentran instalados.

Se debe tomar muy en cuenta que este trabajo es una guía de sugerencias y que durante el funcionamiento puede ser que las características varíen de un rodamiento a otro, aun siendo estos del mismo tipo.

## **OBJETIVOS**

### **General:**

Presentar los principios básicos para la correcta selección y aplicación de los diferentes tipos de rodamientos que se encuentran actualmente en el mercado.

### **Específicos:**

1. Identificar los diferentes factores que se deben tomar en cuenta para la selección adecuada del tamaño del rodamiento según sea la carga a soportar.
2. Determinar los diferentes límites de velocidad y los momentos de fricción a soportar según sea la clasificación de los rodamientos a utilizar.
3. Obtener un mejor conocimiento en materia de rodamientos, así como conocer los materiales para la construcción de los mismos y de sus componentes, tales como obturaciones, jaulas, bolas, rodillos, etc.
4. Complementar los conocimientos de aplicación y selección con los de lubricación, montaje y desmontaje de los rodamientos.





## INTRODUCCIÓN

Como es de conocimiento de todos, en este mundo moderno ha ido creciendo la preocupación por mantener y recuperar nuestro medio ambiente.

Las máquinas que se fabrican en la actualidad, además de cumplir su objetivo, están diseñadas para ser amigables con el ecosistema y su entorno. Los ingenieros para poder crear dichas máquinas para satisfacer las necesidades del mercado se responsabilizan con la naturaleza y el medio ambiente; tal es la seriedad del caso que en esta nueva era de la tecnología todo lo que se construye se hace pensando en un ahorro de energía.

Tomando en cuenta que el ahorro y aprovechamiento de energía es una necesidad creciente e importantísima, se expone en este trabajo de graduación como tema la correcta selección y aplicación de los rodamientos en la industria moderna; esto debido a que los rodamientos son principales elementos para la construcción de cualquier máquina.

La correcta selección y aplicación de los rodamientos contribuye de forma positiva al medio ambiente, permitiendo que la maquinaria funcione de un modo más eficiente; consumiendo menos energía y requiriendo menos lubricación. Al elevar el nivel de rendimiento de nuestras máquinas estamos poniendo en marcha una nueva generación tecnológica con equipos de alta eficiencia, pensando en el futuro y en el mundo que dejaremos a nuestros hijos.



# 1. SELECCIÓN DEL TIPO DE RODAMIENTO

## 1.1 Selección del tipo de rodamiento

Cada rodamiento presenta propiedades características que dependen de su diseño y que lo hacen más o menos adecuado para la aplicación determinada. Por ejemplo, los rodamientos rígidos de bolas pueden soportar cargas radiales moderadas, así como cargas axiales. Tiene una baja fricción y pueden ser fabricados con una gran precisión y con un diseño de funcionamiento silencioso. Por lo tanto estos rodamientos son los preferidos para los motores eléctricos de tamaño pequeño y mediano.

Los rodamientos de rodillos a rótula pueden soportar cargas muy elevadas y son autoalineables. Estas propiedades hacen que sean especialmente adecuados para aplicaciones de ingeniería pesada, donde existen cargas muy elevadas, flexiones de eje y desalineaciones.

Más sin embargo en muchas ocasiones se deben de considerar diversos factores y relacionarlos entre sí al momento de seleccionar el correcto rodamiento. Abajo se describen los principios más importantes a considerar en el momento de seleccionar un rodamiento estándar y con estos realizar una elección apropiada.

- Espacio disponible
- Cargas
- Desalineación
- Precisión
- Velocidad
- Funcionamiento silencioso

- Rigidez
- Desplazamiento axial
- Montaje y desmontaje.

Se debe tener en cuenta también el costo total de una selección de rodamientos y las consideraciones sobre el inventario también pueden influir en la decisión final.

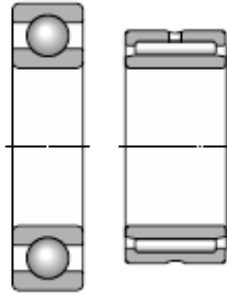
Otros criterios importantes a tener en cuenta a la hora de seleccionar un rodamiento son, la capacidad de carga y la duración, la fricción, las velocidades admisibles, el juego interno del rodamiento o la precarga, la lubricación y las obturaciones.

## **1.2 Espacio disponible**

En muchos casos, una de las dimensiones principales del rodamiento, es el diámetro del agujero, y viene determinado por las características de diseño de la maquina y por el diámetro del eje.

Para los ejes de diámetro pequeño, se puede utilizar cualquier tipo de rodamiento de bolas, siendo los rodamientos rígidos de bolas los más utilizados; para estos casos los rodamientos de agujas también son adecuados.

**Figura 1. Rodamientos de bolas y de agujas**

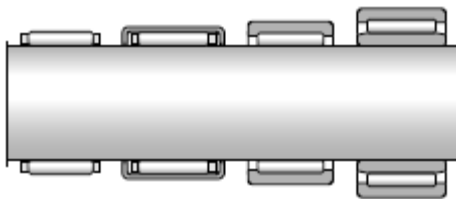


Fuente: General Catalogue SKF

Para ejes de diámetros grandes, se pueden considerar los rodamientos de rodillos cilíndricos, cónicos, a rótula, así como los rodamientos rígidos de bolas.

Cuando el espacio radial disponible es limitado, se deberán seleccionar rodamientos de sección transversal pequeña, particularmente los de baja altura de sección, las coronas de agujas con o sin aro interior también son muy adecuadas.

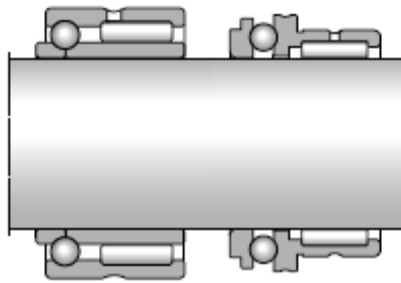
**Figura 2. Rodamientos de agujas con y sin aro interior**



Fuente: General Catalogue SKF

Así como determinadas series de rodamientos rígidos de bolas, rodamientos de bolas con contacto angular, rodamientos de rodillos cilíndricos, cónicos y a rótula. Cuando el espacio axial es limitado, se pueden usar algunas series de rodamientos de rodillos cilíndricos y rodamientos rígidos de bolas para cargas radiales y combinadas respectivamente, así como los diversos rodamientos de agujas combinados.

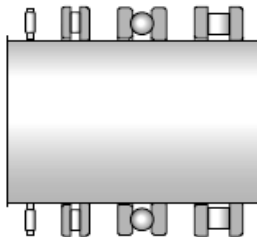
**Figura 3. Rodamientos de agujas combinados**



Fuente: General Catalogue SKF

Para las cargas puramente axiales se pueden usar coronas axiales de agujas (con o sin arandelas), así como rodamientos axiales de bolas y rodamientos axiales de rodillos cilíndricos.

**Figura 4. Coronas axiales de agujas con y sin arandelas**



Fuente: General Catalogue SKF

## **1.3 Cargas**

En las cargas de los rodamientos se deben de tomar en cuenta dos factores que son de suma importancia, estos son la magnitud de la carga en el rodamiento y el sentido de carga en el rodamiento.

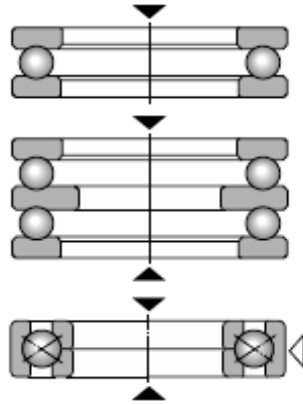
### **1.3.1 Magnitud de la carga**

La magnitud de la carga es uno de los factores que suele determinar el tamaño del rodamiento a utilizar. Por lo general, los rodamientos de rodillos pueden soportar mayores cargas que los rodamientos de bolas de tamaño similar, y los rodamientos completamente llenos de elementos rodantes pueden soportar mayores cargas que los rodamientos con jaula correspondientes. Los rodamientos de bolas son los más utilizados cuando las cargas son ligeras o moderadas. Para cargas elevadas y ejes de gran diámetro, la elección más adecuada son los rodamientos de rodillos.

### **1.3.2 Sentido de la carga**

El sentido de la carga es la dirección en la que se aplica la misma, esta puede ser de tres tipos diferentes, carga radial, que es cuando se aplica perpendicularmente a el eje de rotación, los rodamientos de rodillos cilíndricos de una sola hilera, y los rodamientos de agujas solo pueden soportar cargas puramente radiales. Todos los demás rodamientos radiales pueden soportar algunas cargas axiales además de las cargas radiales para las que vienen diseñados. También tenemos la carga axial, esta es la que se aplica sobre el eje de rotación del rodamiento, los rodamientos axiales de bolas y los rodamientos de cuatro puntos de contacto son los adecuados para las cargas ligeras o moderadas puramente axiales.

**Figura 5. Rodamientos de bolas de cuatro puntos de contacto**



Fuente: General Catalogue SKF

Los rodamientos axiales de bolas de simple efecto solo pueden soportar cargas axiales en un sentido; para las cargas axiales en ambos sentidos, son necesarios los rodamientos de bolas de doble efecto.

Los rodamientos axiales de bolas con contacto angular pueden soportar cargas axiales moderadas a altas velocidades; en estos casos los rodamientos de simple efecto también pueden soportar cargas radiales simultáneas, mientras que los rodamientos de doble efecto se usan para cargas puramente axiales.

Para las cargas axiales moderadas y elevadas en un sentido los rodamientos más adecuados son los rodamientos axiales de agujas y los rodamientos axiales de rodillos cilíndricos y cónicos, así como los rodamientos axiales de rodillos a rótula. Los rodamientos axiales de rodillos a rótula también pueden soportar cargas radiales simultáneas. Para las cargas axiales externas elevadas, se pueden montar dos rodamientos axiales de rodillos cilíndricos o de rodillos a rótula adyacentes entre sí.

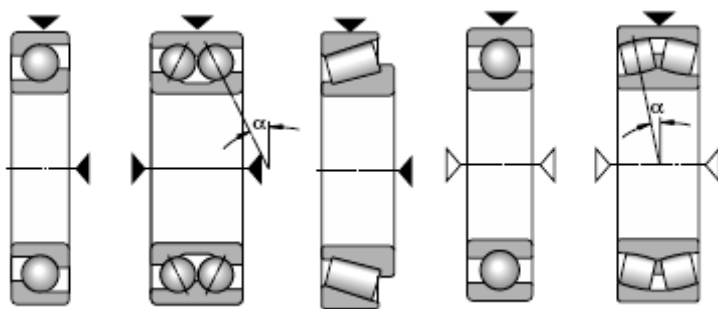


También tenemos las cargas combinadas, esta es la que consta de una carga radial y una carga axial que actúan simultáneamente. La capacidad que tiene un rodamiento para soportar una carga axial esta determinada por su ángulo de contacto  $\alpha$ ; cuando mayor es dicho ángulo, más adecuado es el rodamiento para soportar cargas axiales. El factor de cálculo  $\gamma$ , que disminuye al aumentar el ángulo de contacto  $\alpha$ , proporciona una indicación para esto.

La capacidad de carga axial de los rodamientos rígidos de bolas depende de su diseño interno y del juego interno del rodamiento.

Para las cargas combinadas se usan principalmente los rodamientos de una y de dos hileras de bolas con contacto angular y los rodamientos de una hilera de rodillos cónicos, aunque los rodamientos rígidos de bolas y los rodamientos de rodillos a rótula también son adecuados.

**Figura 6. Rodamientos de una y dos hileras de bolas y rodamientos de rodillos a rotula**

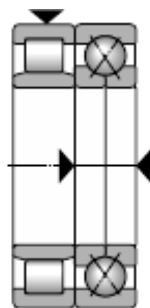


Fuente: General Catalogue SKF

Los rodamientos de una hilera de bolas con contacto angular, los rodamientos de rodillos cónicos, los rodamientos de rodillos cilíndricos de una hilera, los rodamientos de rodillos cilíndricos de una hilera + aro angular, y los rodamientos axiales de rodillos a rótula, sólo pueden soportar cargas axiales en un sentido. Para las cargas axiales variables, estos rodamientos se deben combinar con un segundo rodamiento. Por esta razón los rodamientos de una hilera de bolas con contacto angular están disponibles para apareamiento universal y se pueden suministrar rodamientos de una hilera de rodillos cónicos apareados.

Cuando la componente axial de las cargas es elevada, ésta puede ser soportada, independientemente de la carga radial, por un rodamiento independiente. Además de los propios rodamientos axiales, existen algunos rodamientos radiales, como los rodamientos rígidos de bolas o los rodamientos de bolas de cuatro puntos de contacto que son adecuados para este tipo de tareas.

**Figura 7. Rodamiento de bolas de cuatro puntos de contacto**



Fuente: General Catalogue SKF

En estos casos para tener la seguridad de que el rodamiento sólo se somete a la carga axial, el aro exterior del rodamiento se debe montar con un huelgo radial.

#### **1.4 Desalineación**

Las desalineaciones angulares entre el eje y el soporte se pueden originar por ejemplo, por la flexión del eje bajo la carga de funcionamiento, cuando los asientos de los rodamientos en el soporte no están mecanizados a la vez o cuando los ejes están soportados por rodamientos montados en soportes distintos y a gran distancia entre sí.

Los rodamientos rígidos, es decir los rodamientos rígidos de bolas y los rodamientos de rodillos cilíndricos, no pueden soportar ninguna desalineación, o sólo desalineaciones muy pequeñas, a no ser que se fuercen. Por otra parte los rodamientos autoalineables, es decir, los rodamientos de bolas a rótula y los rodamientos axiales de rodillos a rótula, pueden soportar desalineaciones producidas bajo las cargas de funcionamiento y también pueden compensar los errores de alineación iniciales producidos por errores de mecanización o de montaje. Los rodamientos axiales de bolas con arandelas de alojamiento esféricas y aros de asiento, y los rodamientos de agujas autoalineables pueden compensar la desalineación inicial debida a errores de mecanización o de montaje.

## **1.5 Precisión**

Para las aplicaciones que requieren una alta precisión de funcionamiento y altas velocidades, se requieren rodamientos con una precisión mayor que la normal (por ejemplo disposiciones de husillos de máquinas herramientas). Se fabrican diferentes tipos de rodamiento de alta precisión, entre estos se encuentran los rodamientos de una hilera de bolas con contacto angular, los rodamientos de una hilera y dos hileras de rodillos cilíndricos y los rodamientos de bolas con contacto angular de simple o de doble efecto.

## **1.6 Velocidad**

La temperatura de funcionamiento admisible limita la velocidad a la que los rodamientos pueden funcionar. Los rodamientos que ofrecen una baja fricción y por lo tanto, una baja generación de calor interno, son los más apropiados para el funcionamiento a alta velocidad. Las velocidades más altas se pueden alcanzar con los rodamientos de bolas a rótula, cuando las cargas son puramente radiales y con los rodamientos de bolas con contacto angular para cargas combinadas. Esto es particularmente cierto para los rodamientos de bolas con contacto angular de alta precisión o para los rodamientos rígidos de bolas con elementos rodantes cerámicos.

Debido a su diseño los rodamientos axiales no pueden soportar velocidades tan altas como los rodamientos radiales.

## **1.7 Funcionamiento silencioso**

En ciertas aplicaciones, por ejemplo motores eléctricos para electrodomésticos o equipos de oficina, el ruido producido durante el funcionamiento es un factor importante y definitivamente puede influir en la correcta selección de un rodamiento, los rodamientos rígidos de bolas se fabrican especialmente para este tipo de especificaciones.

## **1.8 Rigidez**

La rigidez de un rodamiento se caracteriza por la magnitud de la deformación elástica (resiliencia) del rodamiento bajo carga. Normalmente, esta deformación es muy pequeña y puede ser ignorada. En algunos casos, por ejemplo en los husillos para máquina herramienta o en disposiciones de rodamientos en engranajes, la rigidez es un factor importante. Debido al contacto entre los elementos rodantes y los caminos de rodadura, los rodamientos de rodillos, por ejemplo, de rodillos cilíndricos o de rodillos cónicos son más rígidos que los rodamientos de bolas. La rigidez de los rodamientos puede amentarse aún más utilizando una precarga.

## **1.9 Desplazamiento axial**

Los ejes u otros componentes rotativos de la máquina están generalmente soportados por un rodamiento fijo y otro libre. Los rodamientos fijos proporcionan una fijación axial para el componente de la máquina en ambos sentidos. Los rodamientos más adecuados para este fin son los que admiten cargas combinadas, o los que puede proporcionar un guiado axial en

combinación con un segundo rodamiento. Los rodamientos deberán permitir el desplazamiento axial del eje, de manera que los rodamientos no se sobrecarguen, por ejemplo, a causa de la dilatación térmica del eje. Entre los rodamientos más adecuados para la posición libre, se encuentran los rodamientos de agujas y los rodamientos de rodillos cilíndricos de una sola hilera y también se pueden usar rodamientos completamente llenos de rodillos cilíndricos.

Para las aplicaciones que requieren un desplazamiento axial relativamente grande y en el que el eje puede estar desalineado, el rodamiento ideal es el de agujero cilíndrico o cónico con rodillos guiados por la jaula. Estos rodamientos permiten el desplazamiento axial del eje con respecto al alojamiento en el rodamiento. Si se utilizan rodamientos no desarmables, por ejemplo rodamientos rígidos de bolas o rodamientos de rodillos a rotula como rodamientos libres, uno de los aros del rodamiento debe tener un ajuste libre.

## **1.10 Montaje y desmontaje**

Para el montaje y desmontaje de los rodamientos debemos de inspeccionar previamente si son rodamientos de agujero cilíndrico o si son rodamientos de agujero cónico.

### **1.10.1 Agujero cilíndrico**

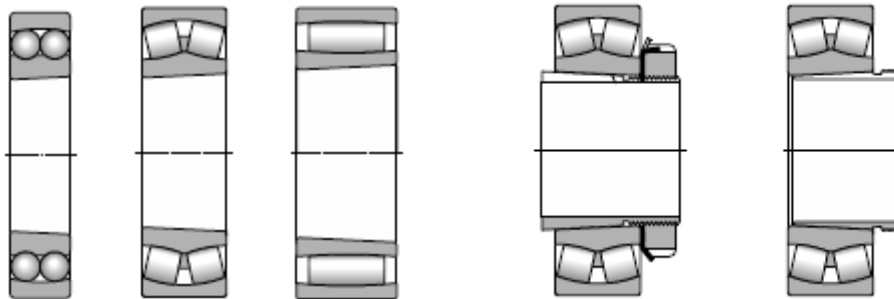
Los rodamientos con agujero cilíndrico son más fáciles de montar y desmontar si son de diseño desarmable, especialmente si se necesitan ajustes de interferencia en ambos aros. Los rodamientos desarmables, también son preferibles cuando el rodamiento ha de ser montado y desmontado con frecuencia, ya que el aro con los elementos rodantes y la jaula, se puede

montar en forma independiente de otro aro, como es el caso de los rodamientos de bolas de cuatro puntos de contacto y los rodamientos de rodillos cilíndricos, cónicos y de agujas, así como los rodamientos axiales de bolas y de rodillos.

### 1.10.2 Agujero cónico

Los rodamientos de agujero cónico se pueden montar fácilmente sobre un eje cónico o en el asiento de un eje cilíndrico usando un manguito de fijación o de desmontaje.

**Figura 8. Diferentes tipos de rodamiento con agujero cónico**



Fuente: General Catalogue SKF





## **2. SELECCIÓN DEL TAMAÑO DEL RODAMIENTO**

### **2.1 Selección del tamaño del rodamiento**

El tamaño de un rodamiento para una aplicación se selecciona inicialmente en base a su capacidad de carga, en relación con las cargas que tendrá que soportar, y según las exigencias de duración y fiabilidad. Las condiciones de carga estática y dinámica del rodamiento se deben verificar independientemente. Se deben verificar las cargas dinámicas utilizando un espectro representativo de las condiciones de carga del rodamiento. Dicho espectro debe incluir todas las cargas de pico (elevadas) que se puedan producir en ocasiones excepcionales. Las cargas estáticas no sólo son aquellas aplicadas al rodamiento en reposo o a bajas velocidades ( $\eta < 10$  rpm), sino que también deben incluir la verificación de seguridad estática de las cargas de choque muy elevadas (cargas de duración muy breve).

### **2.2 Teoría sobre la vida y la fiabilidad de los rodamientos**

En la fórmula de vida de los rodamientos, se tiene en cuenta la tensión provocada por las cargas externas, junto con las tensiones originadas por la topografía de la superficie, la lubricación y la cinemática de las superficies de contacto. La influencia de esta combinación de tensiones sobre la vida de un rodamiento, permite predecir mejor el funcionamiento real del rodamiento en una aplicación determinada.

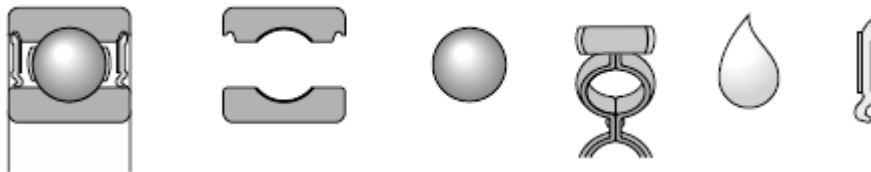
Por regla general, la principal causa de fallo en los rodamientos es a causa de la fatiga del metal de las superficies de contacto. Por lo tanto para seleccionar el tamaño de un rodamiento para una aplicación determinada, generalmente basta con un criterio basado en la fatiga del camino de rodadura.

Sin embargo es importante recordar que el rodamiento completo se puede considerar como un sistema en el que la vida de cada componente, es decir, la jaula, el lubricante, y la obturación, si la hubiese, contribuye por igual a la resistencia del rodamiento, en algunos casos de manera dominante. En teoría, la vida útil óptima se obtiene cuando todos los componentes logran la misma duración.

### Figura 9. Vida del rodamiento

#### Vida del rodamiento

$$L_{\text{rodamiento}} = f(L_{\text{camino de rodadura}}, L_{\text{elementos rodantes}}, L_{\text{jaula}}, L_{\text{lubricante}}, L_{\text{obturaciones}})$$



Fuente: General Catalogue SKF

En otras palabras, la vida calculada corresponderá a la vida útil real del rodamiento cuando la vida de los otros componentes sea como mínimo de la misma duración que la vida del rodamiento. Entre otros componentes se pueden incluir la jaula, la obturación y el lubricante. En la práctica el factor dominante suele ser siempre la fatiga del metal.

### 2.3 Capacidad de carga y vida

Todos los rodamientos tienen dos tipos de capacidad de carga y estas son capacidad de cargas dinámicas y capacidad de cargas estáticas.

### **2.3.1 Cargas dinámicas y vida**

La capacidad de carga dinámica  $C$  se usa en los cálculos para rodamientos sometidos a esfuerzos dinámicos, es decir, rodamientos que giran bajo carga. Expresa la carga que dará una vida nominal, según la normativa ISO 281:1990, de 1,000,000 revoluciones. Se asume que la magnitud y el sentido de la carga son constantes, y que es radial para los rodamientos radiales y axial y centrada para los rodamientos axiales.

Las capacidades de carga dinámica para los rodamientos se han determinado según los métodos descritos en la normativa ISO 281:1990. Las capacidades de carga expresadas en este trabajo de graduación son válidas para los rodamientos de acero al cromo con tratamiento térmico hasta lograr una dureza mínima de 58 HRC, y que operan bajo condiciones normales.

La vida de un rodamiento se define como:

- El número de revoluciones o
- El número de horas de funcionamiento a una velocidad determinada

que el rodamiento puede soportar antes de que se manifieste el primer síntoma de fatiga del metal (desconchado, descascarillado) en uno de sus aros o elementos rodantes.

La experiencia demuestra que rodamientos aparentemente idénticos, funcionando bajo idénticas condiciones, tienen vidas diferentes. Por lo tanto, es esencial una definición más clara del término “vida” para calcular el tamaño del rodamiento. Toda la información que se presenta en este trabajo de graduación sobre capacidades de carga dinámica está basada en la vida alcanzada o sobrepasada por el 90% de los rodamientos aparentemente idénticos de un grupo suficientemente representativo.

Existen otros tipos de vida de un rodamiento. Uno de ellos es “vida de servicio”, que representa la vida real de un rodamiento bajo condiciones reales de funcionamiento antes de fallar. Se debe advertir que la vida de rodamientos individuales sólo se puede predecir estadísticamente. Los cálculos de vida solo hacen referencia a un grupo de rodamientos y a un determinado grado de fiabilidad, es decir, el 90%. Asimismo, los fallos en la práctica no suelen estar causados por la fatiga, sino por contaminación, desgaste, desalineación, corrosión, o debido a fallos en la jaula, la lubricación o la obturación.

Otro tipo de vida es la “vida determinada”. Se trata de la vida determinada por una autoridad, por ejemplo, en base a datos hipotéticos de carga y velocidad facilitados por dicha autoridad o ya sea por el mismo fabricante. Generalmente, es una vida nominal básica  $L_{10}$  basada en la experiencia obtenida con aplicaciones similares.

### **2.3.2 Cargas estáticas**

La capacidad de carga estática  $C_0$  se usa en los cálculos cuando los rodamientos:

- giran a velocidades muy bajas ( $n < 10$  rpm)
- realizan movimientos oscilantes muy lentos
- permanecen estacionarios bajo carga durante largos períodos de tiempo.

También se debe comprobar el factor de seguridad de las cargas de poca duración, como las cargas de choque o las cargas elevadas de pico que actúan sobre un rodamiento rotativo (sometido a esfuerzos dinámicos) o cuando el rodamiento esta en reposo.

La capacidad de carga estática se define según la ISO 76:1987 como la carga estática que corresponde a una tensión de contacto calculada en el centro de la superficie de contacto más cargada entre los elementos rodantes y los caminos de rodadura de:

- 4,600 MPa para rodamientos de bolas a rótula
- 4,200 MPa para el resto de los rodamientos de bolas
- 4,000 MPa para todos los rodamientos de rodillos.

Esta tensión produce la deformación permanente total del elemento rodante y del camino de rodadura, que es aproximadamente igual al 0.0001 del diámetro del elemento rodante. Las cargas son puramente radiales para los rodamientos radiales, y para los rodamientos axiales son cargas axiales y centradas.

La verificación de las cargas estáticas de los rodamientos se realiza comprobando el factor de seguridad estático en la aplicación, que se define como:

$$S_o = C_o / P_o$$

donde:

$C_o$  = capacidad de carga estática, kN

$P_o$  = carga estática equivalente, kN

$S_o$  = factor de seguridad estático.

En el cálculo de carga estática equivalente se debe utilizar la carga máxima que pueda soportar un rodamiento.

## 2.4 Selección del tamaño del rodamiento utilizando las fórmulas de vida

Se puede seleccionar el rodamiento adecuado utilizando las fórmulas plenamente establecidas para esto, aquí encontramos la fórmula de la vida nominal de un rodamiento.

### 2.4.1 Vida nominal

La vida nominal de un rodamiento se define, según la normativa ISO 281:1990 de la siguiente manera:

$$L_{10} = (C/P)^p$$

Si la velocidad es constante, suele ser preferible calcular la vida expresada en horas de funcionamiento utilizando la ecuación:

$$L_{10h} = (10^6 / 60n) L_{10}$$

donde:

$L_{10}$  = vida nominal (con un 90% de fiabilidad), en millones de revoluciones

$L_{10h}$  = vida nominal (con un 90% de fiabilidad), en horas de funcionamiento

$C$  = capacidad de carga dinámica, kN

$P$  = carga dinámica equivalente del rodamiento, kN

$n$  = velocidad de giro, rpm

$p$  = exponente de la ecuación de la vida

= 3 para los rodamientos de bolas

= 10/3 para los rodamientos de rodillos.

## 2.4.2 Condiciones de lubricación – relación de viscosidad k

La eficacia del lubricante viene determinada fundamentalmente por el grado de separación entre las superficies de contacto de rodadura. Para que se forme una película de lubricante adecuada, éste debe tener una viscosidad mínima cuando la aplicación alcance su temperatura de funcionamiento normal.

Las condiciones del lubricante se describen según la relación de viscosidad “k” como la relación entre la viscosidad real del lubricante “ $\nu$ ” y la viscosidad “ $B\nu_1$ ” necesaria para una lubricación adecuada, teniendo en cuenta ambos valores cuando el lubricante está a una temperatura de funcionamiento normal.

$$k = \nu / B\nu_1$$

donde:

k = relación de viscosidad

$\nu$  = viscosidad real de funcionamiento del lubricante,  $\text{mm}^2/\text{s}$

$B\nu_1$  = viscosidad nominal dependiendo del diámetro medio del rodamiento y de la

velocidad de giro,  $\text{mm}^2/\text{s}$ .

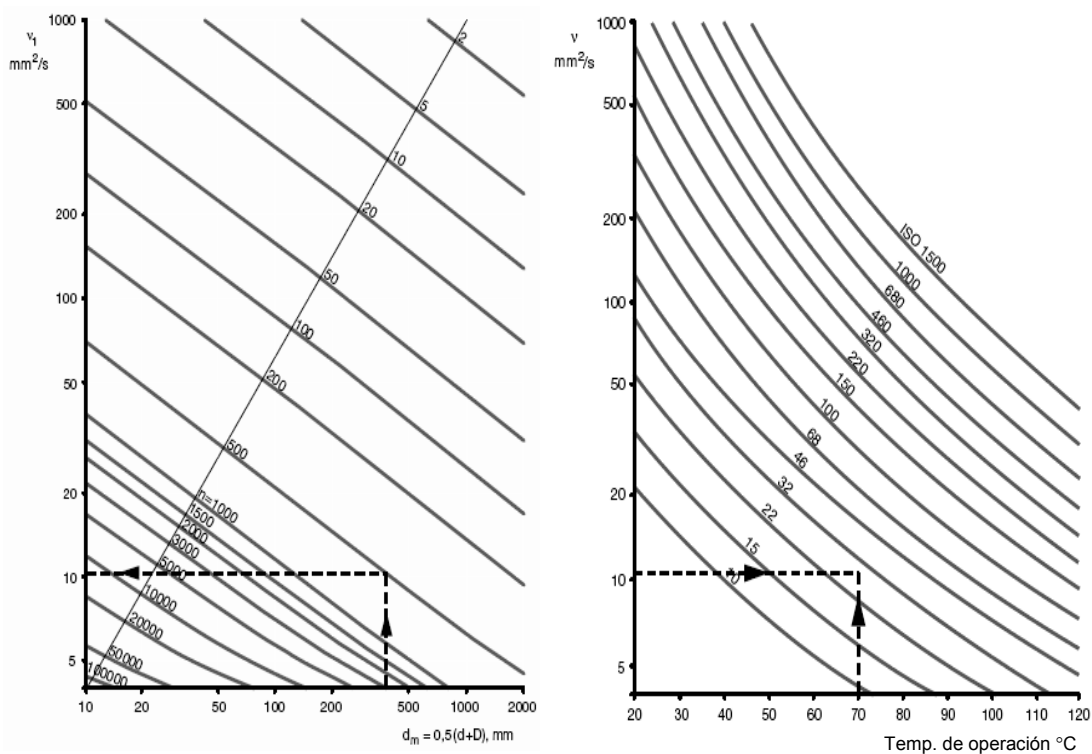
El lubricante debe mantener una viscosidad mínima a la temperatura de funcionamiento para que pueda formar una película de lubricante adecuada entre las superficies de rodadura.

### 2.4.2.1 Ejemplo de cálculo

Un rodamiento con diámetro de agujero  $d = 340$  mm. y un diámetro exterior  $D = 420$  mm. debe funcionar a una velocidad de  $n = 500$  rpm.

Puesto que  $d_m = 0.5 (d + D)$ ,  $d_m = 380$  mm. Como se indica en la figura 10 de estimación de la viscosidad cinemática mínima  $Bu_1$  a la temperatura de funcionamiento, la viscosidad mínima requerida para lograr una apropiada lubricación a la temperatura de funcionamiento es de  $11 \text{ mm}^2/\text{s}$ .

**Figura 10. Estimación de viscosidad cinemática**



Fuente: General Catalogue SKF

Ahora bien, suponiendo que la temperatura de funcionamiento sea  $70^{\circ}\text{C}$ , vemos que según la figura 10 de conversión a la viscosidad cinemática  $v$  a la temperatura de referencia (clasificación ISO VG), que se requerirá un lubricante según la clase de viscosidad ISO VG 32, son una viscosidad real de  $v$  al menos  $32 \text{ mm}^2/\text{s}$  a la temperatura de referencia de  $40^{\circ}\text{C}$ .



**Tabla I. Clasificación de viscosidad según la ISO 3448**

Grado de viscosidad	Límites de viscosidad cinemática a 40°C ( mm <sup>2</sup> /s)		
	Medio	Mínimo	Máximo
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	9.00	11.0
ISO VG15	15	13.5	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	90.0	110
ISO VG150	150	135	162
ISO VG220	220	198	242
ISO VG320	320	288	352
ISO VG460	460	414	506
ISO VG680	680	612	748
ISO VG1100	1100	900	1100
ISO VG1500	1500	1350	1650

### **2.4.3 Consideración de los aditivos EP**

Se sabe que la presencia de alguno aditivos EP en el lubricante puede prolongar la vida útil del rodamiento cuando, de lo contrario, la lubricación sería insuficiente, por ejemplo, si  $k < 1$  y el factor para el nivel de contaminación  $\eta_c \geq 0.2$ , según la normativa DIN ISO 281 Addendum 1:2003, podría usar en el cálculo un valor  $k = 1$ , si se usa el lubricante con aditivos EP de probada eficacia.

Si la contaminación es abundante, es decir, el factor de contaminación  $\eta_c < 0.2$ , se deberán comprobar los posibles beneficios del aditivo EP mediante la realización de pruebas.

### **2.4.4 Factor $\eta_c$ para el nivel de contaminación**

Este factor ha sido introducido con el fin de tener en cuenta el nivel de contaminación del lubricante a la hora de calcular la vida del rodamiento. La influencia de la contaminación en la fatiga del rodamiento depende de una serie de parámetros entre los cuales se incluye el tamaño del rodamiento, el espesor relativo de la película del lubricante, el tamaño y la distribución de las partículas contaminantes sólidas, los tipos de contaminante (blando, duro), etc. La influencia de estos parámetros en la vida del rodamiento es compleja y muchos de ellos son difíciles de cuantificar. Por tanto no es fácil asignar a  $\eta_c$  valores precisos que puedan tener validez general. No obstante a continuación se ofrecen algunos valores orientativos.

**Tabla II. Valores orientativos para el factor  $\eta_c$  para distintos niveles de contaminación**

Condición	Factor $\eta_c$ para rodamientos con diámetro	
	dm < 100 mm	dm $\geq$ 100 mm
<b>Muy limpio</b> Tamaño de partículas del orden del espesor de la película lubricante Condiciones de laboratorio	1	1
<b>Limpio</b> Aceite filtrado a través de un filtro extremadamente fino Condiciones típicas de los rodamientos engrasados y obturados de por vida	0.8 .... 0.6	0.9 .... 0.8
<b>Normal</b> Aceite filtrado a través de un filtro fino Condiciones típicas de los rodamientos engrasados de por vida y con placas de protección	0.6 .... 0.5	0.8 .... 0.6
<b>Contaminación ligera</b> Lubricante ligeramente contaminado	0.5 .... 0.3	0.6 .... 0.4
<b>Contaminación típica</b> Condiciones típicas de los rodamientos sin obturaciones integradas, Filtros de paso grueso, partículas de desgaste y entrada de partículas desde el entorno	0.3 .... 0.1	0.4 .... 0.2
<b>Contaminación severa</b> Entono del rodamiento muy contaminado y obturación inadecuada.	0.1 .... 0	0.1 .... 0
<b>Contaminación muy severa</b> Bajo condiciones de contaminación extrema los valores de $\eta_c$ pueden estar fuera de la escala resultando en una reducción más severa de la vida que la predicha por la ecuación $L_{nm}$	0	0

#### 2.4.5 Cálculo de vida con condiciones de funcionamiento variables

En las aplicaciones en las que la carga del rodamiento varía a lo largo del tiempo, tanto en magnitud como en sentido, con cambios de velocidad, temperatura, condiciones de lubricación y nivel de contaminación, no se puede calcular directamente la vida del rodamiento sin realizar el cálculo intermedio de una carga equivalente relacionada con las condiciones de carga variables.

Debido a la complejidad del sistema este parámetro intermedio no será fácil de determinar y no simplificará la ecuación.

Por lo tanto bajo condiciones fluctuantes, es necesario reducir el espectro de cargas o ciclo de trabajo de la aplicación a un número limitado de casos de cargas más sencillas.

En el caso de una carga continuamente variable, se puede acumular cada nivel de carga diferente y reducir el espectro de cargas, a un histograma de bloques de carga constantes, cada uno de ellos caracterizando un determinado porcentaje o fracción de tiempo del funcionamiento de la aplicación. Se debe advertir que las cargas elevadas y medianas consumen la vida del rodamiento a mayor velocidad que las cargas ligeras. Por tanto resulta importante que las cargas de choque y de pico estén bien representadas en el diagrama de cargas, incluso si son relativamente infrecuentes y están limitadas a pocas revoluciones.

La carga del rodamiento y las condiciones de funcionamiento se pueden promediar a un valor constante dentro de cada intervalo de trabajo o "ciclo". Asimismo, el número de horas de funcionamiento o revoluciones esperado de cada intervalo de trabajo individual muestra la fracción de vida requerida por esa condición de carga en particular. Así por ejemplo si denominamos  $N_1$  al número de revoluciones necesarias bajo las condiciones de carga  $P_1$ , y a  $N$  al ciclo de vida total de la aplicación, entonces la fracción de ciclo de vida  $U_1 = N_1/N$  se utilizará con la condición de carga  $P_1$ , que tiene una vida calculada de  $L_{10m1}$ . Se puede predecir la vida del rodamiento bajo condiciones de carga variables usando la ecuación

$$L_{10m} = \frac{1}{\frac{U_1}{L_{10m1}} + \frac{U_2}{L_{10m2}} + \frac{U_3}{L_{10m3}} + \dots}$$

donde:

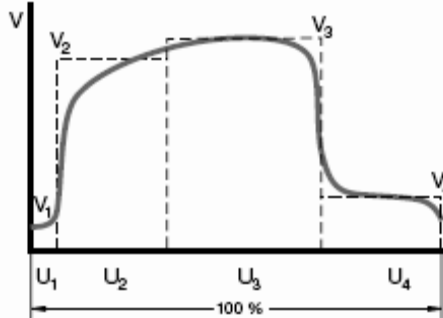
$L_{10m}$  = vida nominal (con un 90% de fiabilidad), en millones de revoluciones

$L_{10m1}, L_{10m2}, \dots$  = vidas nominales (con un 90% de fiabilidad) bajo las constantes  
1, 2, ....., millones de revoluciones

$U_1, U_2, \dots$  = fracción del ciclo de vida bajo las condiciones 1,2, ....

Nota:  $U_1 + U_2 + \dots + U_n = 1$

**Figura 11. Curva de predicción de vida de un rodamiento bajo cargas variables**



Fuente: General Catalogue SKF

El uso de este método de cálculo depende en gran medida de la disponibilidad de diagramas de carga representativos para la aplicación.

#### **2.4.6 Influencia de la temperatura de funcionamiento**

Las dimensiones de un rodamiento en funcionamiento cambian como resultado de las transformaciones estructurales que se producen en el interior del material. La temperatura, el tiempo y la tensión influyen sobre estas transformaciones.

Para evitar cambios dimensionales inadmisibles durante el funcionamiento debido a la transformación estructural, los materiales de los rodamientos se someten a un tratamiento térmico especial llamado estabilización.

Los rodamientos estándar hechos de aceros de temple total y de temple por corrientes de inducción tienen una temperatura máxima de funcionamiento recomendada de entre 120 y 200°C, dependiendo del tipo de rodamiento. Estas temperaturas máximas están directamente relacionadas con el tratamiento térmico.

Si las temperaturas de funcionamiento normales de la aplicación son superiores a la temperatura máxima recomendada, es preferible el uso de un rodamiento con una mayor clase de estabilización.

El funcionamiento satisfactorio de los rodamientos a temperaturas elevadas, también depende de si el lubricante seleccionado puede o no mantener sus propiedades de lubricación y de la adecuación de los materiales empleados para las obturaciones, jaulas, y demás componentes.

#### **2.4.7 Vida nominal requerida**

Al momento en el que se va a determinar el tamaño del rodamiento, es aconsejable verificar la vida nominal calculada con la vida determinada de la aplicación, en caso de conocer ésta última. Normalmente, esto depende del tipo de máquina y de los requisitos relacionados con la duración del servicio y la fiabilidad de funcionamiento. Si no se dispone de experiencia previa en dichos cálculos, se pueden utilizar los valores orientativos señalados para diferentes clases de máquinas.

**Tabla III. Valores orientativos de vida nominal requeridos para diferentes clases de máquinas**

Clase de máquinas	Vida nominal Horas de Funcionamiento
Electrodomésticos, máquinas agrícolas, instrumentos, equipos técnicos de uso medico.	300 ..... 3,000
Máquinas usadas intermitentemente o por cortos períodos de tiempo: herramientas eléctricas portátiles, aparatos elevadores en talleres, máquinas y equipos para la construcción	3,000 ..... 8,000
Máquinas para trabajar con alta fiabilidad de funcionamiento por cortos períodos o intermitentemente: elevadores y grúas	8,000 ..... 12,000
Máquinas para 8 horas de trabajo diario, no siempre totalmente utilizadas: transmisiones por engranaje para uso general, motores eléctricos de uso industrial	10,000 ..... 25,000
Máquinas para 8 horas de trabajo diario totalmente utilizadas: máquinas herramientas, máquinas de aserradero. Máquinas para la industria de ingeniería, grúas para materiales a granel, ventiladores, cintas transportadoras, equipos para imprentas	20,000 ..... 30,000
Máquinas para trabajo continuo 24 horas al día: cajas de engranajes, compresores, tornos, bombas	40,000 ..... 50,000
Máquinas para la industria de energía eólica, esto incluye el eje principal, la orientación, los engranajes, los rodamientos del generador	30,000 ..... 100,000
Máquinas para el abastecimiento de agua, hornos giratorios, máquinas cableadoras, maquinaria de propulsión para trasatlánticos.	60,000 ..... 100,000
Maquinaria eléctrica de gran tamaño, centrales eléctricas, bombas y ventiladores para minas.	> 100,000

## **2.5 Cargas dinámicas del rodamiento**

### **2.5.1 Cálculo de las cargas dinámicas del rodamiento**

Las cargas que actúan sobre un rodamiento se pueden calcular de acuerdo con las leyes de la mecánica siempre que se conozcan o se puedan determinar las fuerzas externas. Cuando se calculan las componentes de carga para un rodamiento individual, el eje se considera como una viga que descansa sobre soportes rígidos y no sometidos a momentos, a efecto de simplificar los cálculos. Tampoco se tienen en cuenta las deformaciones elásticas en el

rodamiento, el soporte o el bastidor de la máquina, ni los momentos producidos en el rodamiento como resultado de la flexión del eje.

Estas simplificaciones son necesarias cuando se realizan los cálculos de una disposición de rodamientos con una asistencia de medios disponibles como las calculadoras de bolsillo. Los métodos normalizados para el cálculo de las capacidades de carga básica y las cargas equivalentes se basan en suposiciones similares.

Las cargas que actúan sobre un rodamiento se pueden calcular en base a la teoría de la elasticidad sin las suposiciones mencionadas anteriormente, pero esto requeriría el uso de complicados programas informáticos.

Las fuerzas externas de, por ejemplo, los pesos propios de los ejes y de los componentes que éstos soportan, o del peso de un vehículo y otras fuerzas de inercia, o bien se conocen o se pueden calcular. No obstante cuando se determinan las fuerzas de trabajo, las fuerzas de choque y las fuerzas dinámicas adicionales, por ejemplo, a causa de un desequilibrio, suele ser necesario confiar en estimaciones basadas en la experiencia obtenida con otras máquinas y disposiciones de rodamientos similares

### **2.5.2 Carga dinámica equivalente del rodamiento**

Si la carga  $F$  del rodamiento obtenida cumple con los requisitos de la carga dinámica  $C$ , es decir si es constante en magnitud y dirección y actúa radialmente sobre un rodamiento radial o axialmente y centrada sobre un rodamiento axial, entonces  $P = F$ , pudiendo introducir la carga directamente en las ecuaciones de vida.



En todos los demás casos, primero es necesario calcular la carga dinámica equivalente del rodamiento. Ésta se define como la carga hipotética, constante en magnitud y dirección, que si actuara radialmente sobre un rodamiento radial o axialmente y centrada sobre un rodamiento axial, tendría el mismo efecto sobre la vida del rodamiento que las cargas reales a las cuales está sometido dicho rodamiento.

Los rodamientos radiales con frecuencia están sometidos a cargas radiales y axiales simultáneamente. Cuando la magnitud y la dirección de la carga resultante son constantes, la carga dinámica equivalente  $P$  se puede calcular con la siguiente ecuación general:

$$P = XF_r + YF_a$$

donde:

$P$  = carga dinámica equivalente del rodamiento, kN

$F_r$  = carga radial real del rodamiento, kN

$F_a$  = carga axial real del rodamiento, kN

$X$  = factor de carga radial del rodamiento

$Y$  = factor de carga axial del rodamiento

En el caso de los rodamientos radiales de una hilera, una carga axial adicional sólo influye la carga dinámica equivalente  $P$  si la relación  $F_a / F_r$  excede un determinado factor límite  $e$ .

Para los rodamientos de dos hileras, incluso las pequeñas cargas axiales influyen de un modo significativo. Esta misma ecuación general también se puede aplicar a los rodamientos axiales de rodillos a rótula, capaces de soportar cargas tanto axiales como radiales. Para los rodamientos axiales que solo pueden soportar cargas puramente axiales, por ejemplo, rodamientos axiales de

bolas y de rodillos cilíndricos, la ecuación se puede simplificar, siempre que la carga esté centrada, y es de la siguiente manera:

$$P = F_a$$

e indica que la carga dinámica equivalente sería igual a la carga axial del rodamiento.

### **2.5.3 Cálculo de las cargas dinámicas del rodamiento en trenes de engranajes y transmisiones por correa**

En trenes de engranajes las fuerzas teóricas que actúan sobre los dientes se pueden calcular conociendo la potencia transmitida y las características del diseño de los dientes del engranaje. No obstante hay fuerzas dinámicas adicionales que se producen en el propio engranaje o por el accionamiento o toma de fuerza. Las fuerzas dinámicas adicionales son producto de los errores de forma de los dientes y de los desequilibrios de los elementos que giran. Debido a las exigencias de un funcionamiento silencioso, los engranajes se fabrican según normas muy estrictas, de precisión, por ello las fuerzas adicionales son generalmente tan pequeñas que no se deben de tomar en cuenta para los cálculos de los rodamientos.

Para calcular las cargas que actúan sobre los rodamientos en el caso de las transmisiones por correa (fajas), es necesario tener en cuenta la tracción efectiva de la correa (fuerza periférica), la cual depende del par que se transmita. La tracción de la correa se deberá multiplicar por un factor cuyo valor depende del tipo de correa, de su precarga, de su tensión y de las fuerzas dinámicas adicionales. Los valores de este factor normalmente son publicados

por los fabricantes de correas. No obstante si no hubiese información disponible, se pueden aplicar los siguientes valores para:

- correas dentadas = 1.1 a 1.3
- correas en “V” = 1.2 a 2.5
- correas planas = 1.5 a 4.5

Los valores más altos se aplican cuando la distancia entre los ejes es corta, para correas bajo cargas elevadas o de choque, o cuando la tensión de la correa es elevada.

## **2.6 Selección del tamaño del rodamiento utilizando la capacidad de carga estática**

### **2.6.1 Selección del tamaño del rodamiento utilizando la capacidad de carga estática**

El tamaño del rodamiento se deberá seleccionar en base a su capacidad de carga estática  $C_0$  y no en base a la vida del rodamiento cuando se produzcan las siguientes condiciones:

- El rodamiento es estacionario y esta sometido a cargas continuas o intermitentes.
- El rodamiento efectúa lentos movimientos de oscilación o alineación bajo carga.
- El rodamiento gira bajo carga a velocidades muy bajas ( $n < 10$  rpm) y sólo se necesita alcanzar una vida corta (en este caso, la ecuación de la vida para una determinada carga equivalente  $P$  daría una capacidad de carga dinámica  $C$  requerida tan baja, que el rodamiento seleccionado

empleando esta fórmula estaría sometido a una sobrecarga durante el servicio).

- El rodamiento gira y tiene que soportar elevadas cargas de choque, además de las cargas de funcionamiento normales.

En todos estos casos la capacidad de carga permisible para el rodamiento no está determinada por la fatiga del material, sino por la deformación permanente del camino de rodadura originada por la carga. Las cargas que actúan sobre un rodamiento estacionario, o sobre un rodamiento que efectúa lentos movimientos de oscilación, así como las cargas de choque que actúan sobre un rodamiento giratorio, pueden dar lugar a superficies aplanadas en los elementos rodantes y a indentaciones en los caminos de rodadura. Estas indentaciones pueden estar distribuidas irregularmente por el camino de rodadura o uniformemente en las posiciones de los elementos rodantes. Si la carga actúa durante varias revoluciones del rodamiento, la deformación se distribuirá por igual por todo el camino de rodadura. Las deformaciones permanentes originadas en el rodamiento pueden dar lugar a vibraciones, ruidos durante el funcionamiento y una mayor fricción. También es posible que aumente el juego interno o que se produzcan cambios en el ajuste.

Estos cambios perjudicaran en mayor o menor medida el rendimiento del rodamiento dependiendo de las exigencias de cada aplicación en particular. Por lo tanto es necesario garantizar que no se produzcan deformaciones permanentes o que éstas sean muy pequeñas, y para conseguirlo se deberá seleccionar un rodamiento que tenga una capacidad de carga estática lo suficientemente elevada para satisfacer los siguientes requisitos:

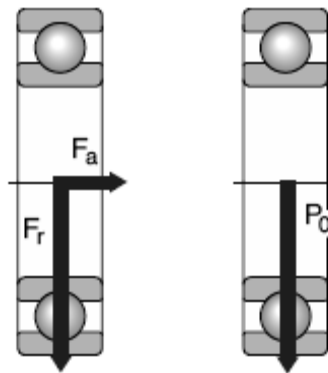
- alta fiabilidad
- funcionamiento silencioso (en motores eléctricos)

- funcionamiento sin vibraciones (en máquinas herramientas)
- par de fricción constante del rodamiento ( en aparatos de medición)
- baja fricción de arranque bajo carga (en grúas).

### 2.6.2 Carga estática equivalente

Las cargas estáticas que tienen componentes radiales y axiales se deben convertir a una carga estática equivalente. Esta se define como la carga hipotética (radial para los rodamientos radiales y axial para los rodamientos axiales) que, de ser aplicada, causaría en el rodamiento las mismas deformaciones permanentes que la carga real.

**Figura 12. Componentes de carga radiales y axiales**



Fuente: General Catalogue SKF

Se obtiene de la siguiente ecuación general:

$$P_o = X_o F_r + Y_o F_a$$

donde:

$P_o$  = carga estática equivalente, kN

$F_r$  = carga radial real del rodamiento, kN

$F_a$  = carga axial real del rodamiento, kN

$X_o$  = factor de carga radial del rodamiento

$Y_o$  = factor de carga axial del rodamiento

Se debe tomar en cuenta que al calcular  $P_o$ , se deberá utilizar la carga máxima permisible así como sus componentes radiales y axiales. Si una carga estática actúa sobre el rodamiento en diferentes sentidos, la magnitud de estas componentes cambiará. En estos casos se deberán utilizar las componentes de carga con el valor máximo de carga estática equivalente  $P_o$ .

### **2.6.3 Capacidad de carga estática requerida**

Cuando el tamaño del rodamiento requerido se determina con 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  $C_o$  y la carga estática equivalente  $P_o$  para calcular la capacidad de carga estática requerida.

La capacidad de carga estática requerida  $C_o$  se puede calcular según la siguiente fórmula:

$$C_o = s_o P_o$$

donde:

$C_o$  = capacidad de carga estática, kN

$P_o$  = carga estática equivalente, kN

$s_o$  = factor de seguridad estático

En la siguiente tabla se encuentran varios valores orientativos basados en la experiencia para el factor de seguridad estático  $s_o$ , para los rodamientos

de bolas y de rodillos en varias aplicaciones que requieren un funcionamiento suave. A temperaturas elevadas, la capacidad de carga estática se reduce.

**Tabla IV. Valores orientativos para el factor de seguridad estático  $s_0$**

Tipo de trabajo	Rodamientos rotativos Requisitos en cuanto a funcionamiento silencioso						Rodamientos estacionarios	
	No importante de bolas	No importante de rodillos	Normal de bolas	Normal de rodillos	Alto de bolas	Alto de rodillos	de bolas	de rodillos
Suave, sin vibración	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 notables	$\geq 1.5$	$\geq 2.5$	$\geq 1.5$	$\geq 3$	$\geq 2$	$\geq 4$	$\geq 1$	$\geq 2$

Nota: Para los rodamientos axiales a rótula es aconsejable usar  $s_0 \geq 4$

#### 2.6.4 Comprobación de la capacidad estática de carga

Para los rodamientos cargados dinámicamente y cuando se conozca la carga estática equivalente del rodamiento  $P_0$ , se recomienda comprobar que la capacidad de carga estática es la adecuada, y esto será usando la siguiente ecuación:

$$S_0 = C_0 / P_0$$

entonces si el valor  $s_0$  obtenido es menor que el valor orientativo recomendado en la tabla anterior, se deberá seleccionar un rodamiento con una mayor capacidad de carga estática.





### 3. FRICCIÓN EN LOS RODAMIENTOS

#### 3.1 Fricción

La fricción en un rodamiento es el factor determinante de la generación de calor en el mismo y por tanto de la temperatura de funcionamiento.

La fricción depende de la carga y de otros factores, entre los que destacan el tipo y el tamaño del rodamiento, la velocidad de funcionamiento y la cantidad de lubricante como también sus propiedades.

La resistencia total de un rodamiento al giro, se compone de la fricción y el deslizamiento originados en los contactos de rodadura, en las superficies de contacto entre los elementos rodantes y la jaula, así como en las superficies de guiado de los elementos rodantes o la jaula, de rozamiento en el lubricante y de la fricción de deslizamiento de las obturaciones rozantes, en caso aplicable.

#### 3.2 Estimación del momento de fricción

Bajo determinadas condiciones:

- carga del rodamiento  $P = 0.1C$
- buena lubricación
- condiciones de funcionamiento normales

Es posible calcular el momento de fricción con precisión suficiente, usando un coeficiente de fricción constante  $\mu$  en la siguiente ecuación:

$$M = 0.5 \mu P d$$

donde:

M = momento de fricción, Nmm

$\mu$  = coeficiente de fricción constante del rodamiento (de tabla)

P = carga dinámica equivalente, N

d = diámetro del agujero del rodamiento, mm

**Tabla V. Coeficiente de fricción constante  $\mu$  para rodamientos sin obturaciones**

Tipos de rodamiento	Coeficiente de fricción $\mu$
Rodamientos rígidos de bolas	0.0015
Rodamientos de bolas con contacto angular	
- de una hilera	0.0020
- de dos hileras	0.0024
- de cuatro puntos de contacto	0.0024
Rodamientos de bolas a rótula	0.0010
Rodamientos de rodillos cilíndricos	
- con jaula, cuando $F_a = 0$	0.0011
- completamente llenos de rodillos, cuando $F_a = 0$	0.0020
Rodamientos de rodillos cónicos	0.0018
Rodamientos de rodillos a rótula	0.0018
Rodamientos axiales de bolas	0.0013
Rodamientos axiales de rodillos cilíndricos	0.0050
Rodamientos axiales de rodillos a rótula	0.0018

### 3.3 Cálculo más preciso del momento de fricción

Un método para calcular el momento de fricción de un rodamiento, es dividir el momento de fricción en un momento independiente de la carga  $M_o$  y un momento dependiente de la carga  $M_1$  para después sumarlos, dando como resultado la ecuación:

$$M = M_o + M_1$$

Éste ha sido el método hasta hace poco. No obstante, se dispone de métodos más precisos si la división se basa en la fuente de fricción en lugar de

su dependencia de la carga. De hecho,  $M_o$  hace referencia a las fuerzas de fricción externas adicionales, junto con el componente “hidrodinámico” de la fricción por rodadura, que también depende en parte de la carga.

Para calcular con precisión la fricción de un rodamiento, se deben tener en cuenta cuatro fuentes diferentes:

$$M = M_{rr} + M_{sl} + M_{seal} + M_{drag}$$

donde:

$M$  = momento de fricción total, Nmm

$M_{rr}$  = momento de fricción por rodadura, Nmm

$M_{sl}$  = momento de fricción por deslizamiento, Nmm

$M_{seal}$  = momento de fricción de las obturaciones, Nmm

$M_{drag}$  = momento de fricción de las pérdidas de energía, agitación, salpicadura, etc, Nmm

Este nuevo planteamiento identifica las fuentes de fricción de todos los contactos que se producen en el rodamiento y las combina. Además se pueden añadir la contribución de la obturación y las fuentes externas adicionales, según sea necesario para predecir el momento de fricción total.

### **3.4 Nuevo modelo para el cálculo del momento de fricción**

El nuevo modelo para el cálculo del momento de fricción permite un cálculo más preciso del momento de fricción generado en los rodamientos según la fórmula:

$$M = M_{rr} + M_{sl} + M_{seal} + M_{drag}$$

este modelo matemático ha sido diseñado para ofrecer unos valores de referencia aproximados, según las siguientes condiciones de aplicación:

- Lubricación con grasa o métodos normales de lubricación con aceite, goteo de aceite e inyección de aceite.
- Para los rodamientos apareados se debe calcular el momento de fricción de cada rodamiento por separado y sumar los momentos. La carga radial se divide por igual entre los dos rodamientos, mientras que la carga axial se reparte según la disposición del rodamiento.
- Cargas iguales o mayores que la carga mínima recomendada.
- Cargas de magnitud y dirección constante.
- Juego de funcionamiento normal.

### 3.4.1 Momento de fricción por rodadura

El momento de fricción por rodadura se calcula con la siguiente ecuación:

$$M_{rr} = G_{rr}(\nu n)^{0.6}$$

donde:

$M_{rr}$  = momento de fricción por rodadura, Nmm

$G_{rr}$  = variable que depende del

- tipo de rodamiento
- el diámetro medio del rodamiento  $d_m = 0.5(d + D)$ , mm
- la carga radial  $F_r$ , N
- la carga axial  $F_a$ , N

$n$  = velocidad de giro, rpm

$\nu$  = viscosidad cinemática del lubricante a la temperatura de funcionamiento,  $\text{mm}^2/\text{s}$  (para la lubricación con grasa la viscosidad del aceite base)

### 3.4.2 Momento de fricción por deslizamiento

El momento de fricción por deslizamiento se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$M_{sl} = G_{sl} \mu_{sl}$$

donde:

$M_{sl}$  = momento de fricción por deslizamiento, Nmm

$G_{sl}$  = variable que depende del

- tipo de rodamiento
- el diámetro medio del rodamiento  $d_m = 0.5(d + D)$ , mm
- la carga radial  $F_r$ , N
- la carga axial  $F_a$ , N

$\mu_{sl}$  = coeficiente de fricción por deslizamiento, que se puede establecer como el valor para las condiciones de película total, es decir  $k \geq 2$ ,

0.05 para la lubricación con aceites minerales

0.04 para la lubricación con aceites sintéticos

0.10 para la lubricación con fluidos de transmisión

para los rodamientos con rodillos cilíndricos o cónicos se deben usar en su lugar los siguientes valores:

0.02 para los rodamientos de rodillos cilíndricos

0.002 para los rodamientos de rodillos cónicos

### 3.4.3 Momento de fricción de las obturaciones

Si los rodamientos están equipados con obturaciones rozantes, las pérdidas por fricción causadas por la obturación pueden ser mayores que aquellas generadas en el rodamiento. Se puede calcular el momento de fricción de las obturaciones para los rodamientos obturados a ambos lados utilizando la siguiente ecuación empírica:

$$M_{\text{seal}} = K_{s1}d_s^\beta + K_{s2}$$

donde:

$M_{\text{seal}}$  = momento de fricción de las obturaciones, Nmm

$K_{s1}$  = constante que depende del tipo de rodamiento

$K_{s2}$  = constante que depende del tipo de rodamiento y de obturación

$d_s$  = diámetro de la superficie de contacto de la obturación

$\beta$  = exponente que depende del tipo de rodamiento y obturación

Los valores para las constantes  $K_{s1}$  y  $K_{s2}$  y el exponente  $\beta$  se muestran en la tabla de momento de fricción de las obturaciones.  $M_{\text{seal}}$  es el momento de fricción para dos obturaciones. Cuando solo hay una obturación, la fricción generada es  $0.5 M_{\text{seal}}$  y para las obturaciones RSL de los rodamientos rígidos de bolas con un diámetro exterior superior a 25 mm, se debe usar el valor de  $M_{\text{seal}}$  independientemente del número de obturaciones.

**Tabla VI. Momento de fricción de las obturaciones,  
exponente y constantes**

Tipo de obturación Tipo de rodamiento	Diámetro exterior del rodamiento "D"		Exponente y constantes			Diámetro de la superficie de contacto de la obturación
	más de	Hasta incl.	$\beta$	$K_{s1}$	$K_{s2}$	$d_s^1$
<b>Obturaciones RSL</b> Rodamientos rígidos de bolas	25	25 52	0 2.25	0 0.0018	0 0	$d_2$ $d_2$
<b>Obturaciones RZ</b> Rodamientos rígidos de bolas		175	0	0	0	$d_1$
<b>Obturaciones RSH</b> Rodamientos rígidos de bolas		52	2.25	0.028	2	$d_2$
<b>Obturaciones RS1</b> Rodamientos rígidos de bolas	62 80 100	62 80 100	2.25 2.25 2.25	0.023 0.018 0.018	2 20 15 0	$d_1, d_2$ $d_1, d_2$ $d_1, d_2$ $d_1, d_2$
Rodamientos de bolas con contacto angular	30	120	2	0.014	10	$d_1$
Rodamientos de bolas a rótula	30	125	2	0.014	10	$d_2$
<b>Obturaciones LS</b> Rodamientos de rodillos cilíndricos	42	360	2	0.032	50	E
<b>Obturaciones CS, CS2 y CS5</b> Rodamientos de rodillos a rótula	62	300	2	0.057	50	$d_2$

<sup>1</sup> Las dimensiones de los diámetros de las obturaciones se obtienen de los productos mismos

### 3.4.4 Efectos adicionales sobre los momentos de fricción de los rodamientos

Con la finalidad de conocer más a fondo el comportamiento real de los rodamientos, se pueden tomar en cuenta efectos adicionales en el nuevo modelo del cálculo de fricción, e introducirlos en la ecuación. Entre estos efectos adicionales se encuentran:

- la reducción por calentamiento del lubricante producido por el esfuerzo cortante en el borde de entrada entre el camino de rodadura y los elementos rodantes

- efectos en la velocidad causados por una reposición / falta de suministro para la lubricación con goteo de aceite, inyección de aceite, grasa y baño con bajo nivel de aceite
- efecto de las pérdidas de energía debido al agitación del aceite en la lubricación con baño de aceite
- lubricación mixta para bajas velocidades y/o bajas viscosidades.

Incluyendo estas fuentes adicionales, la ecuación final para el momento de fricción total de un rodamiento es:

$$M = \Phi_{ish} \Phi_{rs} M_{rr} + M_{sl} + M_{seal} + M_{drag}$$

donde:

$M$  = momento de fricción total del rodamiento, Nmm

$M_{rr} = G_{rr}(\nu n)^{0.6}$

$M_{sl} = G_{sl} \mu_{sj}$

$M_{seal} = K_{s1} d_s^\beta + K_{s2}$

$M_{drag}$  = momento de fricción de las pérdidas de energía, agitación, salpicadura, etc, Nmm

$\Phi_{ish}$  = factor de reducción por calentamiento del lubricante producido por el esfuerzo cortante en el borde de entrada entre el camino de rodadura y los elementos rodantes

$\Phi_{rs}$  = factor de reducción por reabastecimiento cinemático

Los factores de reducción  $\Phi_{ish}$  y  $\Phi_{rs}$  se introducen en el nuevo modelo de fricción para dar cuenta de los efectos de la reducción por calentamiento del lubricante producido por el esfuerzo cortante en el borde de entrada entre el camino de rodadura y el elemento rodante, y el reabastecimiento a alta velocidad de la fricción por rodadura respectivamente. El coeficiente de fricción



por deslizamiento  $\mu_{si}$  aumenta para las bajas velocidades, para dar cuenta del régimen de lubricación mixto.

### **3.4.5 Factor de reducción por calentamiento del lubricante en la entrada entre el camino de rodadura y los elementos rodantes**

Cuando en el rodamiento hay suficiente lubricante, no todo el lubricante puede pasar entre el camino de rodadura y los elementos rodantes, y sólo se utiliza una pequeña cantidad del mismo para formar el espesor de la película. Debido a este efecto, parte del aceite que se encuentra cerca de la entrada de los contactos en el camino de rodadura y los elementos rodantes será rechazado, y producirá un flujo inverso.

**Figura 13. Flujo inverso en la entrada de los contactos**



Fuente: General Catalogue SKF

Este flujo inverso corta el lubricante, generando un calor que disminuye la viscosidad del aceite y reduce el espesor de la película y el componente de fricción por rodadura.

Para los valores descritos anteriormente, el factor de reducción por calentamiento de lubricante en la entrada entre el camino de rodadura y los elementos rodantes se puede obtener de la fórmula siguiente:

$$\Phi_{ish} = \frac{1}{1 + 1.84 \times 10^{-9} (n d_m)^{1.28} \nu^{0.64}}$$

donde:

$\Phi_{ish}$  = factor de reducción por calentamiento del lubricante en la entrada entre el camino de rodadura y los elementos rodantes

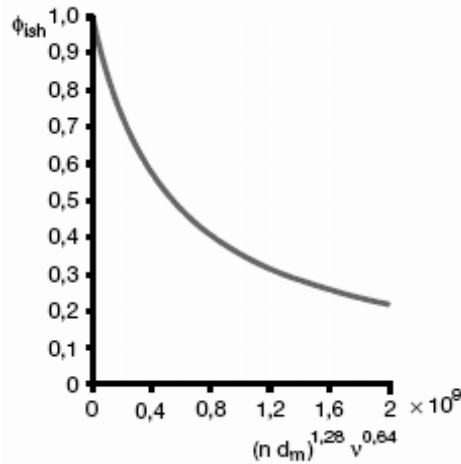
n = velocidad de giro, rpm

$d_m$  = el diámetro medio del rodamiento =  $0.5(d + D)$ , mm

$\nu$  = viscosidad cinemática del lubricante a la temperatura de funcionamiento,  $\text{mm}^2/\text{s}$  (para una lubricación con grasa, usar viscosidad de aceite base).

Los valores para el factor de calentamiento del lubricante en la entrada entre el camino de rodadura y los elementos rodantes  $\Phi_{ish}$ , se muestran en la figura como función del parámetro combinado  $(n d_m)^{1.28} \nu^{0.64}$ .

**Figura 14. Factor de calentamiento del lubricante en el borde de entrada entre el camino de rodadura y los elementos rodantes  $\Phi_{ish}$**



Fuente: General Catalogue SKF

### 3.4.6 Factor de reducción por reabastecimiento cinemático

Para la lubricación con goteo de aceite, inyección de aceite, baño de aceite de bajo nivel, (por ejemplo el nivel de aceite es inferior al centro del elemento rodante más bajo) y la lubricación con grasa, el movimiento de giro de los caminos de rodadura puede expulsar el exceso de lubricante. Debido a la velocidad del rodamiento o a la alta viscosidad, puede que no le de tiempo al lubricante en la entrada entre el camino de rodadura y los elementos rodantes a llenar los caminos de rodadura. Este efecto se llama “reabastecimiento cinemático”, y causa el descenso del espesor de la capa del lubricante y de la fricción por rodadura.

Se puede obtener el valor aproximado para el factor de reducción por reabastecimiento cinemático, para las condiciones de lubricación descritas anteriormente, con la fórmula

**Figura 15. Fórmula de factor de reducción por reabastecimiento cinemático**

$$\Phi_{rs} = \frac{1}{e^{K_{rs} v n (d+D)} \sqrt{\frac{K_z}{2(D-d)}}}$$

Fuente: General Catalogue SKF

donde:

$\Phi_{rs}$  = factor de reducción por reabastecimiento cinemático

$e$  = base de los logaritmos naturales  $\approx 2.718$

$K_{rs}$  = la constante de reposición / falta de suministro  $3 \times 10^{-8}$  para baño de aceite y lubricación con inyección de aceite de bajo nivel  
 $6 \times 10^{-8}$  para lubricación con grasa y goteo de aceite

$K_z$  = constante geométrica relacionada con el tipo de rodamiento (ver tabla de constantes geométricas  $K_z$  y  $K_L$ )

$v$  = viscosidad cinemática a la temperatura de funcionamiento,  $\text{mm}^2/\text{s}$

$n$  = velocidad de giro, rpm

$d$  = diámetro del agujero de rodamiento, mm

$D$  = diámetro exterior del rodamiento, mm

**Tabla VII. Constantes geométricas  $K_z$  y  $K_L$**

Tipo de rodamiento	Constantes geométricas	
	$K_z$	$K_L$
Rodamientos rígidos de bolas - de una y dos hileras	3.1	-
Rodamientos de bolas con contacto angular		
- de una hilera	4.4	-
- de dos hileras	3.1	-
- de cuatro puntos de contacto	3.1	-
Rodamiento de bolas a rótula	4.8	-
Rodamientos de rodillos cilíndricos		
- con jaula	5.1	0.65
- completamente llenos de rodillos	6.2	0.70
Rodamientos de rodillos cónicos	6	0.7
Rodamientos de rodillos a rótula	5.5	0.8
Rodamientos axiales de bolas	3.8	-
Rodamientos axiales de rodillos cilíndricos	4.4	0.43
Rodamientos axiales de rodillos a rótula	5.6	0.58

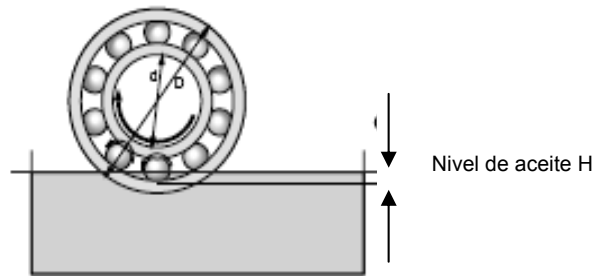
### **3.4.7 Pérdidas de energía por la agitación del aceite en lubricación con baño de aceite**

Debido a que las pérdidas de energía por agitación del aceite son las fuentes adicionales de fricción más importantes, el término de fuente adicional se reduce por tanto al componente de pérdidas de energía por agitación del aceite  $M_{drag}$ .

En la lubricación con baño de aceite, el rodamiento se sumerge parcialmente o, en situaciones especiales, completamente. En esas condiciones, el tamaño y la geometría del depósito de aceite, junto con el nivel de aceite utilizado, pueden tener una importante influencia en el momento de fricción del rodamiento. Para un baño de aceite muy grande, sin tener en cuenta el tamaño del depósito ni ninguna influencia de otros elementos mecánicos en

funcionamiento cerca del rodamiento, por ejemplo la agitación externa del aceite, engranajes o levas, se pueden determinar aproximadamente las pérdidas de energía por agitación del aceite en un rodamiento como una función del nivel de aceite en el depósito a partir de la variable  $V_M$  trazada en la grafica como una función del nivel de aceite  $H$  y el diámetro medio del rodamiento  $d_m = 0.5(d + D)$ . Se puede aplicar la grafica para las velocidades, hasta la velocidad de referencia el rodamiento. A mayores velocidades y con niveles de aceite altos, existen otros efectos que pueden tener una importante influencia en los resultados.

**Figura 16. Nivel de aceite H en un baño de aceite**



Fuente: General Catalogue SKF

La variable  $V_M$  en la gráfica está relacionada con el momento de fricción de las pérdidas de energía por agitación del aceite para los rodamientos de bolas mediante la fórmula:

$$M_{\text{drag}} = V_M K_{\text{ball}} d_m^5 n_2$$

y para los de rodillo mediante la fórmula:

$$M_{\text{drag}} = 10V_M K_{\text{roll}} B d_m^4 n_2$$

donde:

$M_{drag}$  = momento de fricción de las pérdidas de energía por agitación del aceite,  
Nmm

$V_M$  = variable en función del nivel de aceite (ver figura)

$K_{ball}$  = constante relacionada con el rodamiento de bolas (ver abajo)

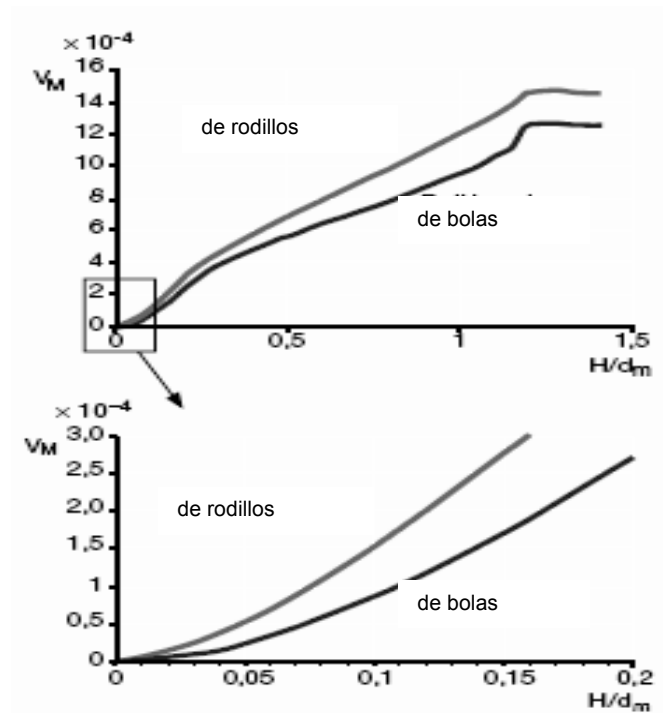
$K_{roll}$  = constante relacionada con el rodamiento de rodillos (ver abajo)

$d_m$  = diámetro medio del rodamiento, mm

$B$  = anchura del aro interior del rodamiento, mm

$n$  = velocidad de giro, rpm

**Figura 17. Variable de pérdida de energía por agitación del aceite  $V_M$**



Fuente: General Catalogue SKF

Los valores para la variable  $V_M$  se muestran en la figura de pérdida de energía por agitación, la curva inferior es para los rodamientos de bolas y la curva superior para los rodamientos de rodillos.

La constante relacionada con los rodamientos de bolas se define como:

**Figura 18. Ecuación para la constante relacionada con los rodamientos de bolas**

$$K_{\text{ball}} = \frac{i_{rw} K_z (d+D)}{D-d} \times 10^{-12}$$

Fuente: General Catalogue SKF

y la variable relacionada con los rodamientos de rodillos se define como:

**Figura 19. Ecuación para la constante relacionada con los rapamientos de rodillos**

$$K_{\text{roll}} = \frac{K_L K_z (d+D)}{D-d} \times 10^{-12}$$

Fuente: General Catalogue SKF

donde:

$K_{\text{ball}}$  = constante relacionada con los rodamientos de bolas

$K_{\text{roll}}$  = constante relacionada con los rodamientos de rodillos

$i_{rw}$  = número de hileras de bolas

$K_z$  = constante geométrica relacionada con el tipo de rodamiento



$K_L$  = constante geométrica relacionada con el tipo de rodamiento de rodillos

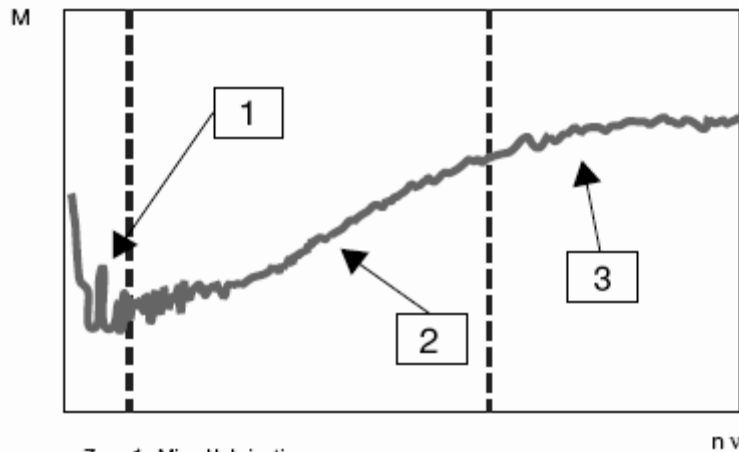
$d$  = diámetro del agujero del rodamiento, mm

$D$  = diámetro externo del rodamiento, mm

### **3.4.8 Lubricación mixta para bajas velocidades y viscosidades**

Para las condiciones de funcionamiento con valores  $k$  pequeños ( $\leq 2$ ) la aplicación se encuentra en el régimen de lubricación mixta, y se pueden producir contactos ocasionales entre piezas metálicas aumentando la fricción. En la figura del momento de fricción del rodamiento como función de la velocidad y la viscosidad, se muestra un momento de fricción típico de un rodamiento como función de la velocidad de giro y la viscosidad. Durante el período de la puesta en marcha con una creciente velocidad o viscosidad, el momento de fricción disminuye, ya que la película de lubricante se está formando y el rodamiento entra en un régimen elasto-hidrodinámico (ELH) total. Con mayores velocidades o viscosidades, la fricción aumenta debido al aumento del grosor de la película hasta que la falta de suministro debido a la alta velocidad y los efectos térmicos reduzcan de nuevo la fricción.

**Figura 20. Momento de fricción del rodamiento como función de la velocidad y la viscosidad**



Fuente: General Catalogue SKF

Zona 1: Lubricación mixta

Zona 2: EHL Lubricación elasto-hidrodinámica

Zona 3: EHL + efectos térmicos y reabastecimiento

### 3.4.9 Efectos del juego y la desalineación en la fricción

El momento de fricción se verá modificado por los cambios en el juego y/o por desalineación de los rodamientos. El modelo ideal considera un juego normal y un rodamiento alineado. Sin embargo, las altas temperaturas de funcionamiento o las elevadas velocidades del rodamiento podrían reducir su juego interno, por lo que puede incrementar la fricción. Por lo general, la desalineación incrementa la fricción. No obstante para los rodamientos de bolas a rótula, los rodamientos de rodillos a rótula y los rodamientos axiales de rodillos a rótula, el aumento de la fricción correspondiente con la desalineación es insignificante.

### 3.4.10 Efectos del llenado de grasa en la fricción

Cuando se utiliza lubricación con grasa y se acaba de llenar (o rellenar) el rodamiento con la cantidad de grasa recomendada, el rodamiento puede mostrar unos valores de fricción significativamente más altos que los originalmente calculados durante las primeras horas o días de funcionamiento. Esto se debe a que la grasa tarda algún tiempo en redistribuirse dentro del espacio libre del rodamiento. Para calcular este efecto, se debe multiplicar el momento de fricción por rodadura inicial por un factor de 2 para las series ligeras, y un factor de 4 para las series pesadas. No obstante, después de este período de “rodaje”, el momento de fricción disminuye hasta unos valores similares a los de los rodamientos lubricados con aceite, y en muchos casos es posible que los valores sean incluso más bajos.

### 3.5 Par de arranque

El par de arranque en un rodamiento se define como el momento de fricción que debe vencer el rodamiento para poder empezar a girar partiendo de un estado estacionario. A una temperatura ambiente normal de +20 a +30°C, comenzando a una velocidad de cero con  $\mu_{sl} = \mu_{bl}$ , el par de arranque se puede calcular únicamente usando el momento de fricción por deslizamiento y el momento de fricción de las obturaciones. Por tanto:

$$M_{start} = M_{sl} + M_{seal}$$

donde:

$M_{start}$  = momento de fricción por arranque, Nmm

$M_{sl}$  = momento de fricción por deslizamiento, Nmm

$M_{seal}$  = momento de fricción de las obturaciones, Nmm

No obstante, el par de arranque puede ser considerablemente mayor para los rodamientos con un gran ángulo de contacto, hasta cuatro veces mayor para los rodamientos de rodillos cónicos y hasta ocho veces mayor para los rodamientos axiales de rodillos a rótula.

### 3.6 Pérdida de potencia y temperatura del rodamiento

Se puede obtener la pérdida de potencia en un rodamiento como resultado de la fricción del mismo usando la siguiente ecuación:

$$N_R = 1.05 \times 10^{-4} M n$$

donde:

$N_R$  = pérdida de potencia, W

$M$  = momento de fricción total del rodamiento, Nmm

$n$  = velocidad de giro, rpm

Si se conoce el factor de refrigeración (el calor a ser evacuado del rodamiento por grado de diferencia de temperatura entre éste y el ambiente), se puede obtener un cálculo aproximado del incremento de temperatura en el rodamiento mediante la fórmula siguiente:

$$\Delta T = N_R / W_s$$

donde:

$\Delta T$  = incremento de temperatura, °C

$N_R$  = pérdida de potencia, W

$W_s$  = factor de refrigeración, W/°C

## **4. VELOCIDADES Y VIBRACIONES EN LOS RODAMIENTOS**

### **4.1 Velocidades y vibración**

La velocidad de funcionamiento de un rodamiento tiene un límite. En general, este límite lo marca la temperatura de funcionamiento admisible del lubricante empleado o el material de los componentes del rodamiento.

La velocidad a la cual el rodamiento alcanza la temperatura límite depende del calor generado en el mismo (incluyendo cualquier tipo de calor externo) y de la cantidad de calor que pueda evacuar el éste.

La velocidad que un rodamiento puede alcanzar depende de su tipo, tamaño, diseño interno, carga, lubricación y condiciones de refrigeración, así como del diseño de su jaula, precisión y juego interno. Los rodamientos por lo general están sujetos a dos tipos de velocidades: la velocidad de referencia ó térmica y la velocidad límite o cinemática.

### **4.2 Velocidades de referencia**

La velocidad de referencia o térmica representa el valor de referencia que se debe utilizar para determinar la velocidad de funcionamiento admisible del rodamiento sometido a una carga determinada y con un lubricante con una viscosidad concreta.

Los valores indicados para la velocidad de referencia cumplen con la normativa ISO 15312:2003 (excepto los rodamientos axiales de bolas). Esta normativa ISO ha sido establecida para la lubricación con aceite, pero también es válida para la lubricación con grasa.

La velocidad de referencia para un rodamiento representa la velocidad a la cual, bajo condiciones de funcionamiento especificadas, existe un equilibrio entre el calor generado por el rodamiento y el calor evacuado por el mismo hacia el eje, el soporte y el lubricante. Las condiciones de referencia para obtener este equilibrio térmico, según la normativa ISO 15312:2003 son:

- un incremento de temperatura de 50°C por encima de una temperatura ambiente de 20°C, es decir una temperatura de 70°C para el rodamiento, medida en su aro exterior estacionario o en la arandela de alojamiento;
- para un rodamiento radial: una carga radial constante del 5% de la capacidad de carga estática  $C_0$
- para un rodamiento axial: una carga axial constante del 2% de la capacidad de carga estática  $C_0$
- rodamientos abiertos con un juego normal

**Para rodamientos lubricados con aceite:**

- lubricante: aceite mineral sin aditivos EP con  $\nu = 12\text{mm}^2/\text{s}$  (ISO VG 32) para rodamientos radiales  $\nu = 24\text{mm}^2/\text{s}$  (ISO VG 68) para rodamientos axiales de rodillos
- método de lubricación: baño de aceite con el aceite hasta la mitad del elemento rodante en la posición más baja.

**Para rodamientos lubricados con grasa:**

- lubricante: grasa regular con espesante lítico de entre 100 y 200 $\text{mm}^2/\text{s}$  a 40°C (ISO VG 150)
- cantidad de grasa: aproximadamente el 30% del espacio libre del rodamiento.

Durante el arranque inicial de un rodamiento lubricado con grasa, se puede producir un pico de temperatura. Por tanto, antes de alcanzar la temperatura de funcionamiento normal el rodamiento puede tener que funcionar hasta 10 ó 20 horas.

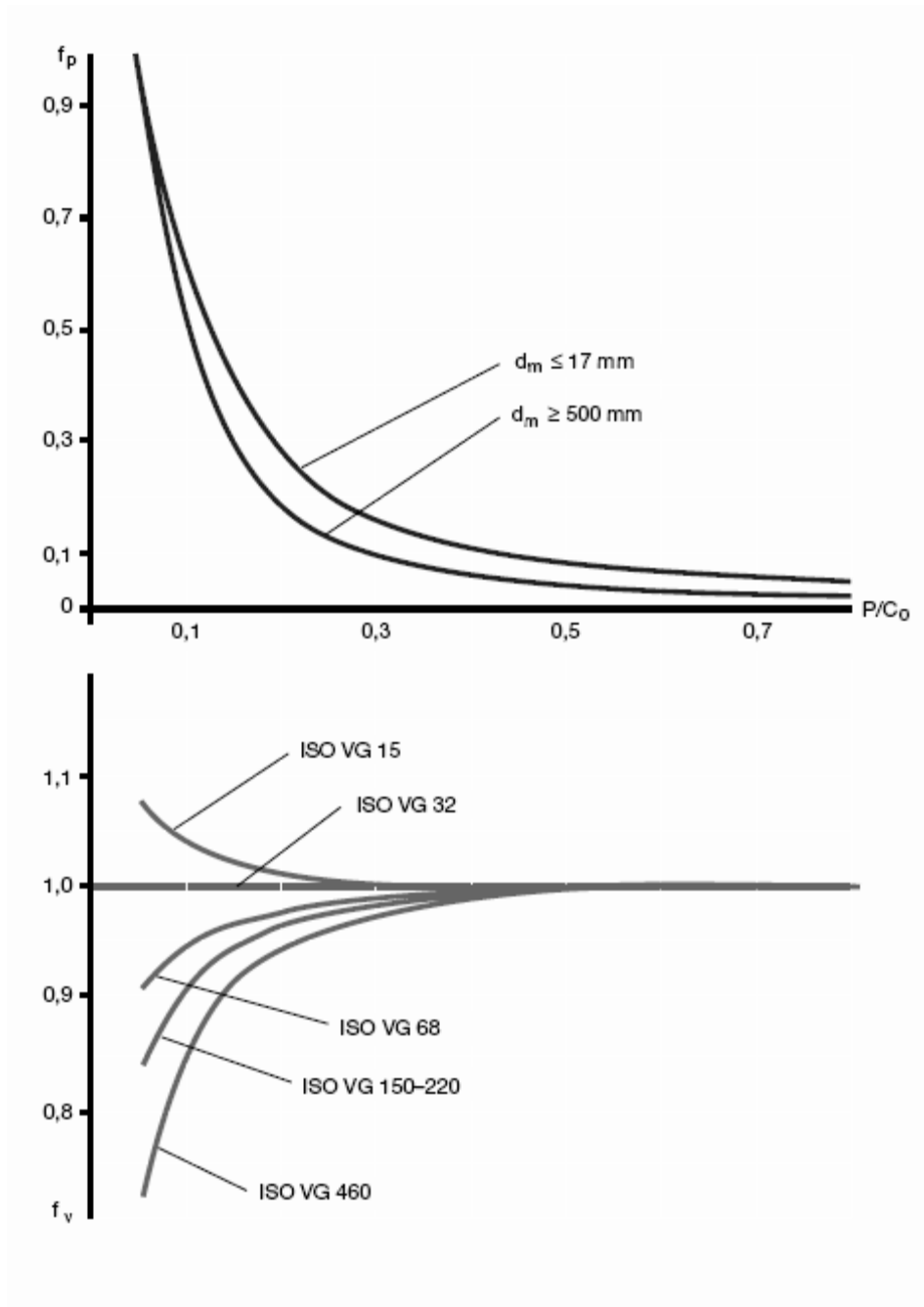
Bajo estas condiciones específicas, la velocidad de referencia para la lubricación con aceite y con grasa será la misma. Cuando el aro exterior gira, es posible sea necesario reducir las velocidades.

Para determinados rodamientos en los que el límite de velocidad no está determinado por el calor producido en los contactos de los elementos rodantes/caminos de rodadura, sólo se muestran las velocidades límites en las especificaciones del fabricante, entre estos encontramos los rodamientos con obturaciones rozantes.

#### **4.2.1 Influencia de la carga y de la viscosidad del aceite en la velocidad de referencia/velocidad permisible**

Cuando los valores de carga y de viscosidad son mayores que los valores de referencia, se incrementa la fricción, de modo que el rodamiento no puede funcionar a la velocidad de referencia sugerida, a no ser que se permitan temperaturas más altas. Unos valores de viscosidad más bajos pueden resultar en velocidades de funcionamiento más altas. En las figuras 21 y 22 se muestra la influencia de la carga y de la viscosidad cinemática sobre la velocidad de referencia.

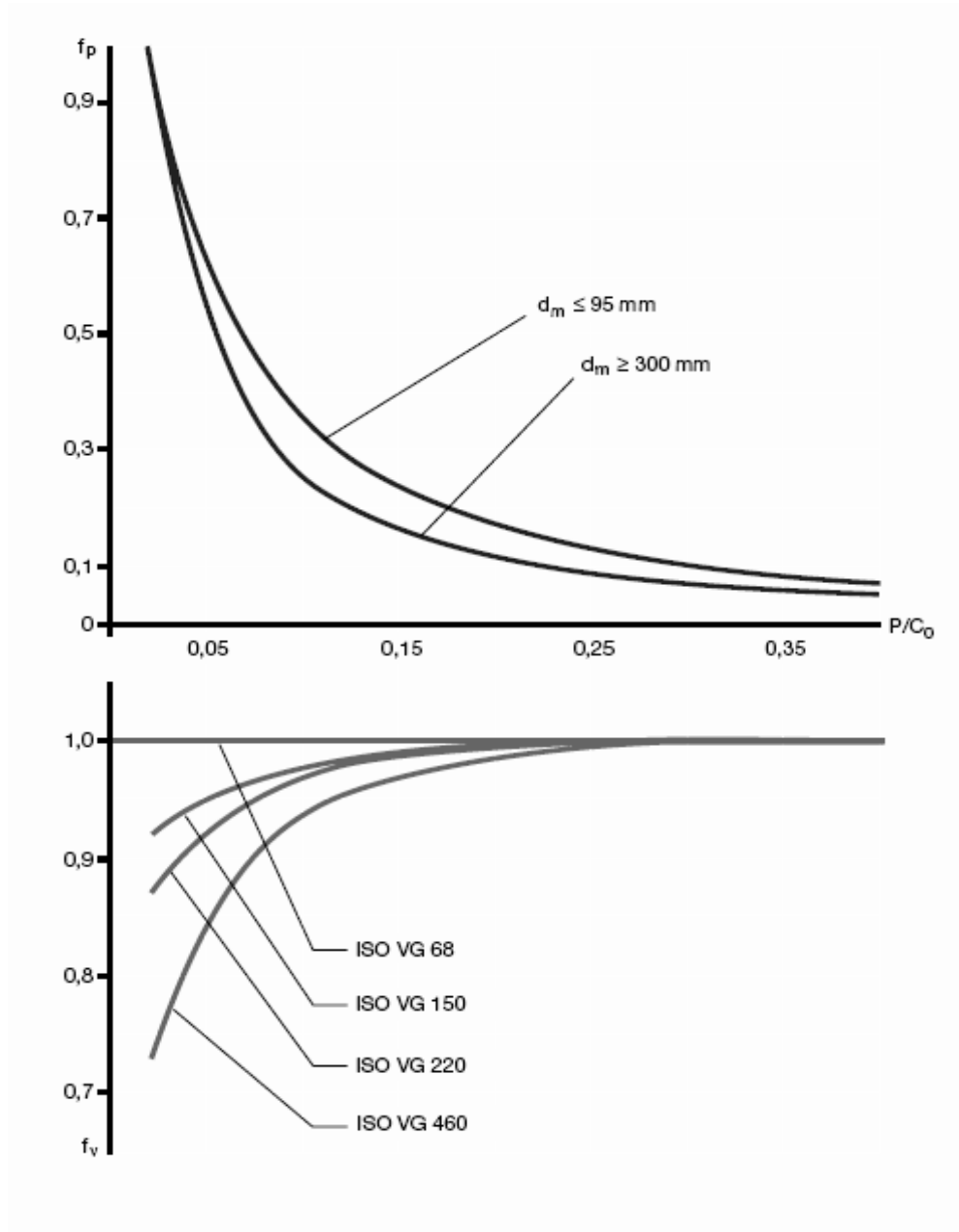
Figura 21. Factores de ajuste  $f_p$  y  $f_v$  para los rodamientos de bolas



Fuente: General Catalogue SKF



**Figura 22. Factores de ajuste  $f_p$  y  $f_v$  para los rodamientos axiales de rodillos**



Fuente: General Catalogue SKF

Los factores de ajuste para la lubricación con aceite son:

- $f_p$  = para la influencia de la carga dinámica equivalente del rodamiento P
- $f_v$  = para la influencia de la viscosidad

se pueden obtener de las figuras 21 y 22 según  $P/C_o$  y el diámetro medio del rodamiento  $d_m$

donde:

$P$  = carga dinámica equivalente del rodamiento, kN

$C_o$  = capacidad de carga estática, kN

$d_m$  = diámetro medio del rodamiento, =  $0.5(d+D)$ , mm

Los valores de viscosidad de las figuras vienen indicados con designaciones ISO, por ejemplo, ISO VG 32, donde 32 es la viscosidad del aceite a 40°C. Si la temperatura de referencia de 70°C ha de ser constante, la velocidad permisible se obtiene de:

$$n_{perm} = n_r f_p f_v$$

$n_{perm}$  = velocidad de giro permisible, rpm

$n_r$  = velocidad de referencia, rpm

$f_p$  = factor de ajuste para la carga del rodamiento P

$f_v$  = factor de ajuste para la viscosidad del aceite

Estos diagramas también son validos para la lubricación con grasa. No obstante, aquí la velocidad de referencia para la lubricación con grasa se basa en una viscosidad de aceite base VG 150, pero también se puede utilizar para el rango de viscosidades ISO VG 100 – ISO VG 200.

#### **4.2.2 Velocidades superiores a la velocidad de referencia**

Un rodamiento puede funcionar a una velocidad superior a la velocidad de referencia si la fricción en su interior se puede reducir con una lubricación en pequeñas cantidades precisas, o extrayendo el calor mediante una lubricación por circulación de aceite, aletas de refrigeración en el soporte o aplicando corrientes de aire frío.

Cualquier aumento de velocidad por encima de la velocidad de referencia sin tener en cuenta estas precauciones puede causar un exceso de temperatura. Esto significa una reducción en la viscosidad del lubricante, lo que dificulta la formación de la película lubricante, y provoca una mayor fricción y temperaturas más altas. Si al mismo tiempo se reduce el juego de funcionamiento del rodamiento debido al aumento de temperatura del aro interior, la consecuencia final será el agarrotamiento del rodamiento.

Cualquier aumento de velocidad por encima de la velocidad de referencia, generalmente supone una diferencia de temperatura entre el aro interior y exterior, superior a lo normal. Por tanto, normalmente se precisa un rodamiento con un juego interno mayor que el normal, y puede que sea necesario prestar especial atención a la distribución de temperatura en el rodamiento.

#### **4.3 Velocidades límite**

La velocidad límite está determinada por criterios entre los que se encuentran la estabilidad de la forma o la resistencia de la jaula, lubricación de las superficies guía de la jaula, las fuerzas centrífugas y giratorias que actúan sobre los elementos rodantes, la precisión y otros factores que limitan la

velocidad, como las obturaciones y el lubricante para los rodamientos obturados.

Las pruebas de laboratorio y las aplicaciones prácticas nos indican que hay velocidades máximas que no se deben exceder, tanto por razones técnicas como por los elevados costes que implica mantener la temperatura de funcionamiento a un nivel aceptable.

Puede que los rodamientos funcionen a velocidades más altas que las específicas, pero entonces deberán considerar algunos factores como la exactitud de giro, el diseño y material de la jaula, la lubricación y la evacuación del calor.

Para una lubricación con grasa se deben de tener en cuenta algunos aspectos adicionales, como la lubricación en las superficies guía de la jaula y la fuerza de cizallamiento del lubricante, determinadas por el aceite base y el espesante.

Algunos rodamientos de bolas abiertos tienen una fricción muy baja, por lo que las velocidades de referencia mostradas pueden superar las velocidades límite. De los dos valores se debe seguir el más bajo.

Se debe recordar que para que un rodamiento funcione satisfactoriamente a altas velocidades, debe estar sometido a una determinada carga mínima.

## **4.4 Casos especiales**

En algunas aplicaciones existen otras consideraciones más importantes que las velocidades límites, estas son las velocidades bajas y los movimientos oscilantes.

### **4.4.1 Velocidades bajas**

A velocidades muy bajas, no se puede formar una película elasto-hidrodinámica de lubricante en los contactos entre los elementos rodantes/caminos de rodadura. En estas aplicaciones se usarán generalmente lubricantes con aditivos EP.

### **4.4.2 Movimientos oscilantes**

En este tipo de movimiento el giro cambia de sentido antes de que el rodamiento haya terminado de dar una vuelta completa. Dado que la velocidad de giro en el punto en que se invierte el sentido de giro es nula, es imposible mantener una película elasto-hidrodinámica completa de un lubricante. En estos casos, se debe usar un lubricante eficaz que contenga un aditivo EP con el fin de conseguir una película mínima capaz de soportar las cargas.

No se puede dar un límite o un valor para la velocidad de dichos movimientos oscilantes, ya que el límite máximo no este regido por el equilibrio térmico, sino por las fuerzas de inercia que entran en juego. Con cada inversión de la dirección, se corre el riesgo de que la inercia haga que los elementos rodantes se deslicen una distancia corta y dañen los caminos de rodadura. Las aceleraciones y desaceleraciones permisibles dependen de la masa de los elementos rodantes y de la jaula, del tipo y cantidad de lubricante, del juego de

funcionamiento y de la carga del rodamiento. Por ejemplo, las barras de conexión usan rodamientos precargados que incorporan elementos rodantes relativamente pequeños. No se pueden dar unas directrices generales, y en cada caso es necesario analizar los movimientos con mayor precisión.

#### **4.5 Generación de vibraciones de un rodamiento**

En general los rodamientos no generan ruido por sí mismos. Lo que percibe como “ruido” es en realidad el efecto sonoro de las vibraciones generadas directa o indirectamente por el rodamiento en la estructura adyacente. Por este motivo, la mayoría de veces los problemas de ruido pueden ser considerados problemas de vibraciones que implican a toda la aplicación.

##### **4.5.1 Agitación debido a la variación del número de elementos rodantes cargados**

Cuando se aplica una carga radial a un rodamiento, el número de elementos rodantes que soportan la carga varía ligeramente durante su funcionamiento, es decir, 2-3-2-3.... Esto genera un desplazamiento en el sentido de la carga. La vibración resultante no se puede evitar, pero se puede reducir aplicando una precarga axial para cargar todos los elementos rodantes (esto no es posible en rodamientos de rodillos cilíndricos).

##### **4.5.2 Precisión de los componentes adyacentes**

Cuando hay un ajuste de interferencia entre el aro del rodamiento y el soporte o el eje, el aro del rodamiento puede tomar la forma del componente adyacente. La deformación puede causar vibraciones durante el

funcionamiento. Por tanto, es importante mecanizar el eje y el asiento del soporte según sean las tolerancias requeridas o específicas.

#### **4.5.3 Daño local**

Las manipulaciones o montajes incorrectos pueden dañar pequeñas secciones de los caminos de rodadura y de los elementos rodantes. Durante el funcionamiento, el excesivo giro de un componente dañado genera una frecuencia de vibración específica. Se puede identificar el componente del rodamiento dañado analizando la frecuencia de las vibraciones, este análisis se realiza mediante ultrasonido.

#### **4.5.4 Contaminantes**

Si el rodamiento funciona en un entorno contaminado, es posible que entren en el rodamiento partículas de suciedad, y que los elementos rodantes hagan girar estas partículas. El nivel de vibración generado depende directamente de la cantidad, el tamaño y la composición de las partículas contaminantes giradas. No se genera ningún modelo de frecuencia típico. No obstante, se puede producir un ruido perceptible y molesto.

### **4.6 Influencia del rodamiento sobre la vibración**

En muchas aplicaciones, la rigidez de los rodamientos es igual que la estructura adyacente. Esto permite reducir las vibraciones de la aplicación seleccionando adecuadamente el rodamiento (incluyendo la precarga y el juego) y su disposición en la aplicación. Existen tres formas de reducir las vibraciones:

- Eliminar la vibración por agitación crítica de la aplicación.
- Amortiguar la vibración por agitación crítica entre el componente agitante y los componentes resonantes.
- Modificar la rigidez de la estructura para modificar la frecuencia crítica.



## **5. DATOS GENERALES DE LOS RODAMIENTOS**

### **5.1 Dimensiones**

Los fabricantes y los usuarios de rodamientos sólo están interesados, por motivos de costes, calidad y facilidad de recambio, en un número limitado de tamaños de rodamientos. En consecuencia, la Organización Internacional de Normalización (ISO) ha establecido unos planes generales para las dimensiones principales de:

- los rodamientos radiales métricos de la normativa ISO 15:1998, excepto los rodamientos de rodillos cónicos
- los rodamientos radiales de rodillos cónicos métricos en la normativa ISO 355:1977
- los rodamientos axiales métricos en la normativa ISO 104:2002.

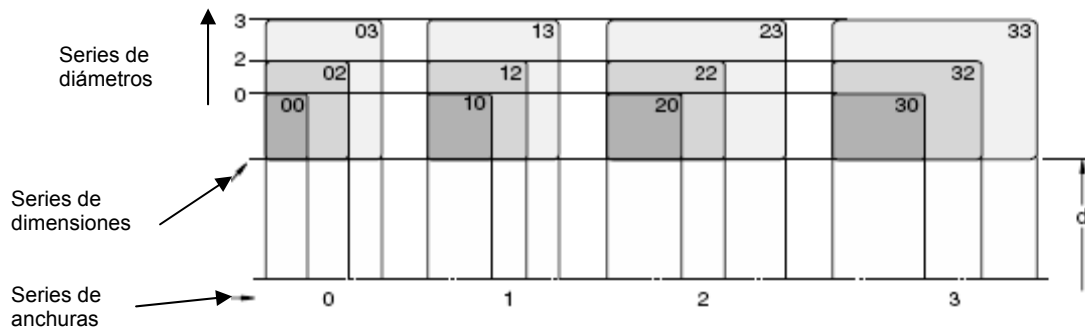
#### **5.1.1 Planes generales de la ISO**

Los planes generales de la ISO para las dimensiones principales de los rodamientos radiales contienen una serie progresiva de diámetros exteriores normalizados para cada uno de los diámetros de agujero estándar expuestos en las series de diámetros 7, 8, 9, 0, 1, 2, 3 y 4 (diámetros exteriores en orden creciente). Dentro de cada serie de diámetros han establecido a su vez diferentes series de anchuras (series de anchuras 8, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7 en orden creciente). Las series de anchuras corresponden a las series de alturas para los rodamientos axiales (series de alturas 7, 9, 1 y 2 en orden creciente).

Mediante la combinación de una serie de anchuras o de alturas con una serie de diámetros, se obtiene una serie de dimensiones, identificada por dos

cifras. La primera cifra indica la serie de anchura o de altura, y la segunda sufra indica la serie de diámetros.

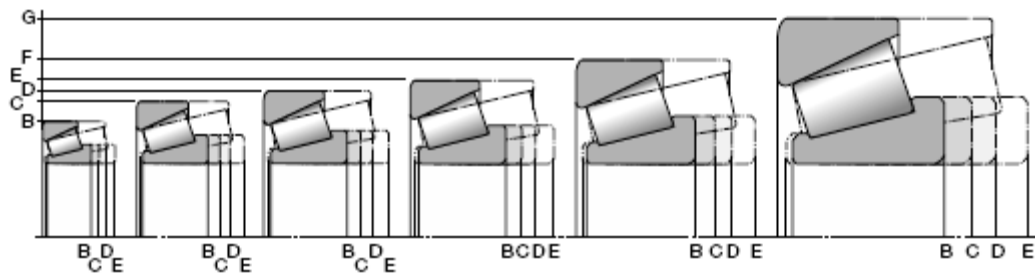
**Figura 23. Relación altura-anchura según las series de los rodamientos**



Fuente: General Catalogue SKF

El plan general de la ISO para los rodamientos de una hilera de rodillos cónicos métricos, las dimensiones principales están agrupadas en determinadas gamas de ángulos de contacto  $\alpha$ , denominadas series de ángulos (series de ángulos 2, 3, 4, 5, 6 y 7 en orden creciente). Las series de diámetros y anchuras han sido establecidas basándose en la relación entre los diámetros exteriores y de agujero, así como entre la anchura total del rodamiento y la altura de sección transversal. En estos rodamientos, las series de dimensiones se obtienen combinando la serie de ángulos con una serie de diámetros y otra de anchuras.

**Figura 24. Combinación de series de ángulos con series de diámetros y anchuras**



Fuente: General Catalogue SKF

Estas series de dimensiones de una cifra para la serie de ángulos y dos letras, donde la primera letra identifica la serie de diámetros y la segunda letra la serie de anchuras.

La experiencia ha demostrado que los requisitos de la gran mayoría de aplicaciones de rodamientos se pueden satisfacer mediante el uso de estas dimensiones normalizadas.

### **5.1.2 Planes generales para rodamientos en pulgadas**

Gran parte de los rodamientos en pulgadas son rodamientos de rodillos cónicos en pulgadas. Las dimensiones de estos rodamientos cumplen con la normativa AFBMA 19-1974 (ABSI B3.19-1975). La normativa ANSI/ABMA 19.2-1994 ha sustituido por tanto a esta normativa, pero ya no incluye las dimensiones.

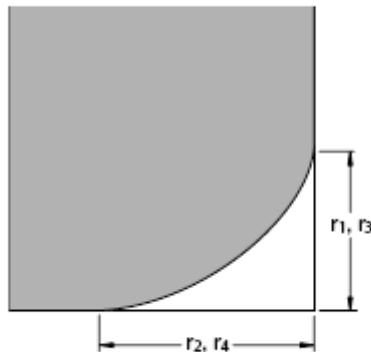
Además de los rodamientos de rodillos cónicos en pulgadas, también se encuentran disponibles algunos rodamientos de bolas y de rodillos cilíndricos en

pulgada que siguen en la anterior normativa británica BS292-1:1982. Esta normativa ha sido retirada en consecuencia de la adopción del sistema métrico, y no se recomienda usar estos rodamientos para diseños nuevos.

### 5.1.3 Dimensiones de los chaflanes

Entre los datos que nos ofrecen los fabricantes de rodamientos, encontramos los valores mínimos para las dimensiones de los chaflanes en sentido radial ( $r_1$ ,  $r_3$ ) y en sentido axial ( $r_2$ ,  $r_4$ ).

**Figura 25. Valores mínimos para las dimensiones de los chaflanes**



Fuente: General Catalogue SKF

Estos valores están de acuerdo con los planes generales indicados en las normativas:

- ISO 15:1998, ISO 12043:1995 e ISO 12044:1995 para los rodamientos radiales
- ISO 355:1977 para los rodamientos radiales de rodillos cónicos
- ISO 104:2002 para los rodamientos axiales.

Los límites máximos adecuados para los chaflanes, que son importantes a la hora de determinar las dimensiones de los radios de acuerdo, cumplen con la normativa ISO 582:1995.

## 5.2 Tolerancias

La precisión dimensional y la exactitud de giro de los rodamientos ha sido normalizada internacionalmente. Además de las tolerancias normales, las normativas ISO incluyen también tolerancias más ajustadas para aplicaciones especiales, como husillos para máquina herramienta.

### 5.2.1 Símbolos de tolerancias

Los símbolos de tolerancia utilizados se encuentran en la tabla de tolerancias, y aparecen junto a su definición.

**Tabla VIII. Símbolos de tolerancias**

Símbolo de tolerancia	Definición
-----	Diámetro del agujero
D	Diámetro nominal del agujero
$d_s$	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Diámetro medio del agujero; media aritmética del mayor y del menor de los diámetros individuales del agujero en un plano</li> <li>2. Diámetro medio en el extremo menor de un agujero cónico; media aritmética del mayor y del menor de los diámetros individuales</li> </ol>
$\Delta_{ds}$	Desviación de un diámetro individual de agujero con respecto al nominal ( $\Delta_{ds} = d_s - d$ )
$\Delta_{dmp}$	Desviación del diámetro medio del agujero con respecto al nominal ( $\Delta_{dmp} = d_{mp} - d$ )
$V_{dp}$	Variación del diámetro del agujero; diferencia entre el mayor y el menor de los diámetros medios del agujero
$d_1$	Diámetro nominal en el extremo teóricamente mayor de un agujero cónico

$d_{1mp}$	Diámetro medio en el extremo teóricamente mayor de un agujero cónico; media aritmética del mayor y del menor de los diámetros de agujero individuales
$\Delta_{d1mp}$	Desviación del diámetro medio del agujero en el extremo teóricamente mayor de un agujero cónico del nominal ( $\Delta_{d1mp} = d_{1mp} - d_1$ )
	<b>Diámetro exterior</b>
D	Diámetro exterior nominal
$D_s$	Diámetro exterior individual
$D_{mp}$	Diámetro exterior medio; media aritmética del mayor y del menor de los diámetros individuales exteriores en un plano
$\Delta_{D_s}$	Desviación de un diámetro exterior individual con respecto al nominal ( $\Delta_{D_s} = D_s - D$ )
$\Delta_{Dmp}$	Desviación del diámetro exterior medio con respecto al nominal ( $\Delta_{Dmp} = D_{mp} - D$ )
$V_{Dp}$	Variación del diámetro exterior; diferencia entre el mayor y menor de los diámetros exteriores individuales en un plano
$V_{Dmp}$	Variación del diámetro exterior medio; diferencia entre el mayor y el menor de los diámetros exteriores medios de un aro o arandela
	<b>Límites de chaflanes</b>
$r_s$	Dimensión individual del chaflán
$r_{s\min}$	Dimensión individual del chaflán más pequeña de $r_s, r_1, r_2, r_3, r_4, \dots$
$r_1, r_3$	Dimensiones de chaflanes en dirección radial
$r_2, r_4$	Dimensiones de chaflanes en dirección axial
	<b>Anchura</b>
B, C	Anchura nominal del aro interior y exterior, respectivamente
$B_s, C_s$	Anchura individual del aro interior y exterior, respectivamente
$B_{1s}, C_{1s}$	Anchura individual del aro interior y exterior, respectivamente, de un rodamiento fabricado específicamente para un montaje apareado
$\Delta_{B_s}, \Delta_{C_s}$	Desviación de la anchura individual del aro interior o del aro exterior respecto a la nominal ( $\Delta_{B_s} = B_s - B$ ; $\Delta_{C_s} = C_s - C$ ; $\Delta_{B_{1s}} = B_{1s} - B_1$ ; $\Delta_{C_{1s}} = C_{1s} - C_1$ )
<b>Símbolo de tolerancia</b>	<b>Definición</b>
-----	Anchura
$V_{B_s}, V_{C_s}$	Variación de las anchuras de los aros; diferencia entre la mayor y la menor anchura individual del aro interior y del exterior, respectivamente
T	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Anchura nominal (anchura del apoyo) de un rodamiento de rodillos cónicos; distancia entre la espalda del aro interior (cono) y la del aro exterior (copa)</li> <li>2. Anchura nominal (H) de un rodamiento axial de simple efecto (excepto los rodamientos axiales de rodillos a rótula, ver <math>T_4</math>)</li> </ol>
$T_1$	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Anchura nominal de un rodamiento de rodillos cónicos, cono montado sobre la copa patrón</li> <li>2. Altura nominal (<math>H_1</math>) de un rodamiento axial de bolas de simple efecto con contraplaca</li> </ol>
$T_2$	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Anchura nominal de un rodamiento de rodillos cónicos, copa montada sobre el cono patrón</li> <li>2. Altura nominal (H) de un rodamiento axial de doble efecto</li> </ol>
$T_3$	Altura nominal ( $H_1$ ) de un rodamiento axial de bolas de doble efecto con contraplacas

$T_4$	Altura nominal (H) de un rodamiento axial de rodillos a rótula
$\Delta_{Ts}$	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Desviación de la anchura individual efectiva de un rodamiento de rodillos cónicos respecto a la nominal</li> <li>2. Desviación de la altura de un rodamiento axial de simple efecto respecto a la nominal (excepto un rodamiento axial de rodillos a rótula, ver <math>\Delta_{T4s}</math>)</li> </ol>
$\Delta_{T1s}$	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Desviación de la anchura individual efectiva de un cono respecto a la nominal</li> <li>2. Desviación de la altura de un rodamiento axial de bolas de simple efecto con contraplaca respecto a la nominal</li> </ol>
$\Delta_{T2s}$	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Desviación de la anchura individual efectiva de la copa respecto a la nominal</li> <li>2. Desviación de la altura de un rodamiento axial de doble efecto respecto a la nominal</li> </ol>
$\Delta_{T3s}$	Desviación de la altura de un rodamiento axial de bolas de doble efecto con contraplacas respecto a la nominal
$\Delta_{T4s}$	Desviación de la altura de un rodamiento axial de rodillos a rótula respecto a la nominal
	Exactitud de giro
$K_{ia}, K_{ea}$	Variación radial del aro interior y exterior, respectivamente, de un rodamiento montado
$S_d$	Variación de la cara lateral respecto al agujero (del aro interior)
$S_D$	Variación en inclinación exterior; variación e inclinación de la superficie cilíndrica exterior respecto a la cara lateral del aro exterior
$S_{ia}, S_{ea}$	Variación axial del aro interior y exterior, respectivamente, de un rodamiento montado
$S_i, S_e$	Variación del espesor, medido en el centro del camino de rodadura respecto a la cara de asiento plana de las arandelas de eje y de alojamiento, respectivamente (variación axial)

### 5.2.2 Identificación de las series de los diámetros

Como las tolerancias para la variación del diámetro exterior y del agujero  $V_{dp}$  y  $V_{Dp}$  citadas en las tablas para los rodamientos métricos, (excepto los rodamientos de rodillos cónicos) no son universalmente validas para todas las series de diámetros, y no siempre es posible identificar la serie de diámetros ISO a la que pertenece un rodamiento por su designación.

**Tabla IX. Series de diámetros para rodamientos radiales**

Tipo de rodamiento	Series de diámetros ISO		
	7, 8, 9	0, 1	2, 3, 4
Rodamientos rígidos de bolas	617, 618, 619 627, 628 637, 638, 639	60 160, 161 630	2, 3 42, 43 62, 63, 64, 622, 623
Rodamientos de bolas con contacto angular			32, 33 72, 73 QJ2, QJ3
Rodamientos de bolas a rótula	139	10, 130	12, 13, 112 22, 23
Rodamientos de rodillos cilíndricos		NU10, 20 NJ 10	NU2, 3, 4, 12, 22, 23 NJ2, 3, 4, 22, 23 NUP2, 3, 22, 23 N2, 3
Rodamientos completamente llenos de rodillos cilíndricos	NCF18, 19, 28, 29 NNC48, 49 NNCF48, 49 NNCL48, 49	NCF30 NNF50 NNCF50	NCF22 NJG23
Rodamientos de rodillos a rótula	238, 239 248, 249	230, 231 240, 241	222, 232 213, 223



### 5.2.3 Tablas de tolerancias

Tabla X. Tolerancias normales para rodamientos radiales

<b>Aro interior</b>													
D		$\Delta_{dmp}$		$V_{dp}$ Series de diámetros 7,8,9 0,1 2,3,4			$V_{dmp}$	$\Delta_{Bs}$		$\Delta_{B1s}$		$V_{Bs}$	$K_{Ia}$
más de	hasta incl.	sup.	inf.	máx	máx	máx	máx	sup.	inf.	sup.	inf.	máx	máx
Mm		$\mu m$		$\mu m$			$\mu m$	$\mu m$		$\mu m$		$\mu m$	Mm
-	2.5	0	-8	10	8	6	6	0	-40	-	-	12	10
2.5	10	0	-8	10	8	6	6	0	-120	0	-250	20	10
10	18	0	-80	10	8	6	6	0	-120	0	-250	20	10
18	30	0	-10	13	10	8	8	0	-120	0	-250	20	13
30	50	0	-12	15	12	9	9	0	-120	0	-250	20	15
50	80	0	-15	19	19	11	11	0	-150	0	-380	25	20
80	120	0	-20	25	25	15	15	0	-200	0	-380	25	25
120	180	0	-25	31	31	19	19	0	-250	0	-500	30	30
180	250	0	-30	38	38	23	23	0	-300	0	-500	30	40
250	315	0	-35	44	44	26	26	0	-350	0	-500	35	50
315	400	0	-40	50	50	30	30	0	-400	0	-630	40	60
400	500	0	-45	56	56	34	34	0	-450	0	-630	50	65
500	630	0	-50	63	63	38	38	0	-500	0	-800	60	70
630	800	0	-75	-	-	-	-	0	-750	-	-	70	80
800	1000	0	-100	-	-	-	-	0	-1000	-	-	80	90
1000	1250	0	-125	-	-	-	-	0	-1250	-	-	100	100
1250	1600	0	-160	-	-	-	-	0	-1600	-	-	120	120
1600	2000	0	-200	-	-	-	-	0	-2000	-	-	140	140
<b>Aro exterior</b>													
D		$\Delta_{Dmp}$		$V_{Dp}$ Series de diámetros 7,8,9 0,1 2,3,4			Rodamientos obturados	$V_{Dmp}$	$\Delta_{Cs}, \Delta_{C1s}, V_{Cs}$			$K_{ea}$	
más de	hasta incl.	sup.	inf.	máx	máx	máx	máx	máx				máx	
Mm		$\mu m$		$\mu m$			$\mu m$					$\mu m$	
2.5	18	0	-8	10	8	6	10	6	Los valores son idénticos a la del aro interior del mismo rodamiento			15	
18	30	0	-9	12	9	7	12	7				15	
30	50	0	-11	14	11	8	16	8				20	
50	80	0	-13	16	13	10	20	10				25	
80	120	0	-15	19	19	11	26	11				35	
120	150	0	-18	23	23	14	30	14				40	
150	180	0	-25	31	31	19	38	19				45	
180	250	0	-30	38	38	23	-	23				50	
250	315	0	-35	44	44	26	-	26				60	
315	400	0	-40	50	50	30	-	30				70	
400	500	0	-45	56	56	34	-	34				80	
500	630	0	-50	63	63	38	-	38				100	
630	800	0	-75	94	94	55	-	55				120	
800	1000	0	-100	125	125	75	-	75				140	
1000	1250	0	-125	-	-	-	-	-				160	
1250	1600	0	-160	-	-	-	-	-				190	
1600	2000	0	-160	-	-	-	-	-				220	
2000	2500	0	-250	-	-	-	-	-				250	

**Tabla XI. Tolerancias para rodamientos de rodillos cónicos métricos**

<b>Aro interior, anchura del rodamiento y anchura de los aros</b>																
d		$\Delta_{dmp}$		$V_{dp}$	$V_{dmp}$	$\Delta_{Bs}$		$\Delta_{Cs}$		$K_{ia}$	$\Delta_{Ts}$		$\Delta_{T1s}$		$\Delta_{T2s}$	
más de	hasta incl.	sup.	inf.	max.	máx	sup.	inf.	sup.	inf.	máx	sup.	inf.	sup.	inf.	sup.	inf.
Mm		Mm		$\mu m$	$\mu m$	$\mu m$		$\mu m$		$\mu m$	$\mu m$		$\mu m$		$\mu m$	
10	18	0	-12	12	9	0	-50	0	-100	15	+100	0	+50	0	+50	0
18	30	0	-12	12	9	0	-50	0	-100	18	+100	0	+50	0	+50	0
30	50	0	-12	12	9	0	-50	0	-100	20	+100	0	+50	0	+50	0
50	80	0	-15	15	11	0	-50	0	-100	25	+100	0	+50	0	+50	0
80	120	0	-20	20	15	0	-50	0	-100	30	+100	0	+50	0	+50	0
120	180	0	-25	25	19	0	-50	0	-100	35	+150	0	+50	0	+100	0
180	250	0	-30	30	23	0	-50	0	-100	50	+150	0	+50	0	+100	0
250	315	0	-35	35	26	0	-50	0	-100	60	+200	0	+100	0	+100	0
315	400	0	-40	40	30	0	-50	0	-100	70	+200	0	+100	0	+100	0

<b>Aro exterior</b>						
D		$\Delta_{Dmp}$		$V_{Dp}$	$V_{Dmp}$	$K_{ea}$
más de	hasta incl.	sup.	inf.	max.	máx	máx
Mm		Mm		$\mu m$	$\mu m$	$\mu m$
18	30	0	-12	12	9	18
30	50	0	-14	14	11	20
50	80	0	-16	16	12	25
80	120	0	-18	18	14	35
120	150	0	-20	20	15	40
150	180	0	-25	25	19	45
180	250	0	-30	30	23	50
250	315	0	-35	35	26	60
315	400	0	-40	40	30	70
400	500	0	-45	45	34	80
500	630	0	-50	50	38	100

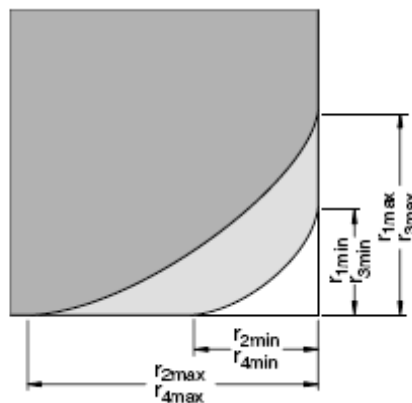
**Tabla XII. Tolerancias para rodillos cónicos en pulgadas**

<b>Aro interior</b>									
<b>d</b>		<b><math>\Delta_{ds}</math></b>							
		Clases de tolerancias Normal, CL2 CL3, CL0							
más de	hasta incl.	sup.	inf.	sup.	inf.				
<b>Mm</b>		<b><math>\mu\text{m}</math></b>							
-	<b>76.2</b>	+13	0	+13	0				
<b>76.2</b>	<b>101.6</b>	+25	0	+13	0				
<b>101.6</b>	<b>266.7</b>	+25	0	+13	0				
<b>266.7</b>	<b>304.8</b>	+25	0	+13	0				
<b>304.8</b>	<b>609.6</b>	+51	0	+25	0				
<b>609.6</b>	<b>914.4</b>	+76	0	+38	0				
<b>Aro exterior</b>									
<b>D</b>		<b><math>\Delta_{Ds}</math></b>				<b><math>K_{ia}, K_{ea}, S_{ia}, S_{ea}</math></b>			
		Clases de tolerancias Normal, CL2 CL3, CL0				Normal	CL2	CL3	CL0
más de	hasta incl.	sup.	inf.	sup.	inf.	máx	máx	máx	máx
<b>Mm</b>		<b><math>\mu\text{m}</math></b>				<b><math>\mu\text{m}</math></b>			
-	<b>304.8</b>	+25	0	+13	0	51	38	8	4
<b>304.8</b>	<b>609.6</b>	+51	0	+25	0	51	38	18	9
<b>609.6</b>	<b>914.4</b>	+76	0	+38	0	76	51	51	26
<b>914.4</b>	<b>1219.2</b>	+102	0	+51	0	76	-	76	38
<b>1219.2</b>	-	+127	0	+76	0	76	-	76	-
<b>Anchura del resalte de un rodamiento de una hilera</b>									
<b>d</b>		<b>D</b>		<b><math>\Delta_{Ts}</math></b>					
				Clases de tolerancias Normal CL2 CL3, CL0					
más de	hasta incl.	más de	hasta incl.	sup.	inf.	sup.	inf.	sup.	inf.
<b>Mm</b>		<b><math>\mu\text{m}</math></b>		<b><math>\mu\text{m}</math></b>					
-	<b>101.6</b>	-	-	+203	0	+203	0	+203	-203
<b>101.6</b>	<b>266.7</b>	-	-	+356	-254	+203	0	+203	-203
<b>266.7</b>	<b>304.8</b>	-	-	+356	-254	+203	0	+203	-203
<b>304.8</b>	<b>609.6</b>	-	508	+381	-381	+381	-381	+203	-203
<b>304.8</b>	<b>609.6</b>	508	-	+381	-381	+381	-381	+381	-381
<b>609.6</b>	-	-	-	+381	-381	-	-	+381	-381

## 5.2.4 Límites para las dimensiones de los chaflanes

Para evitar que las dimensiones de los radios de acuerdo de los componentes adyacentes de los rodamientos sean incorrectas, y para facilitar el cálculo de los anillos de retención, los límites máximos de los chaflanes para las dimensiones mínimas correspondientes, tenemos la indicación de los respectivos radios en la figura 26.

**Figura 26. Radios correspondientes para los límites de los chaflanes**



Fuente: General Catalogue SKF

Estos límites para los rodamientos métricos cumplen con la normativa ISO 582:1995. Los límites de las dimensiones de los chaflanes para los rodamientos de rodillos cónicos en pulgadas, son idénticos a los límites de los rodamientos métricos.

Los símbolos utilizados en las tablas XIII y XIV se muestran junto con sus definiciones en la tabla VIII.

**Tabla XIII. Límites de dimensiones de chaflanes para rodamientos radiales y axiales, excepto los de rodillos cónicos**

Dimensión mínima del chaflán individual	Diámetro nominal del agujero		Dimensiones máximas de chaflanes		
			Rodamientos radiales		Rodamientos axiales
			$r_{1,3}$	$r_{2,4}$	$r_{1,2,3,4}$
$r_s$ min	más de	hasta incl.	máx	máx	máx
<b>Mm</b>	<b>Mm</b>		<b>mm</b>		
<b>0.05</b>	-	-	0.1	0.2	0.1
<b>0.08</b>	-	-	0.16	0.3	0.16
<b>0.1</b>	-	-	0.2	0.4	0.2
<b>0.15</b>	-	-	0.3	0.6	0.2
<b>0.2</b>	-	-	0.5	0.8	0.5
<b>0.3</b>	-	40	0.6	1	0.8
	40	-	0.8	1	0.8
<b>0.6</b>	-	40	1	2	1.5
	40	-	1.3	2	1.5
<b>1</b>	-	50	1.5	3	2.2
	50	-	1.9	3	2.2
<b>1.1</b>	-	120	2	3.5	2.7
	120	-	2.5	4	2.7
<b>1.5</b>	-	120	2.3	4	3.5
	120	-	3	5	3.5
<b>2</b>	-	80	3	4.5	4
	80	220	3.5	5	4
	220	-	3.8	6	4
<b>2.1</b>	-	280	4	6.5	4.5
	280	-	4.5	7	4.5
<b>2.5</b>	-	100	3.8	6	-
	100	280	4.5	6	-
	280	-	5	7	-
<b>3</b>	-	280	5	8	5.5
	280	-	5.5	8	5.5
<b>4</b>	-	-	6.5	9	6.5
<b>5</b>	-	-	8	10	8
<b>6</b>	-	-	10	13	10
<b>7.5</b>	-	-	12.5	17	12.5
<b>9.5</b>	-	-	15	19	15
<b>12</b>	-	-	18	24	18

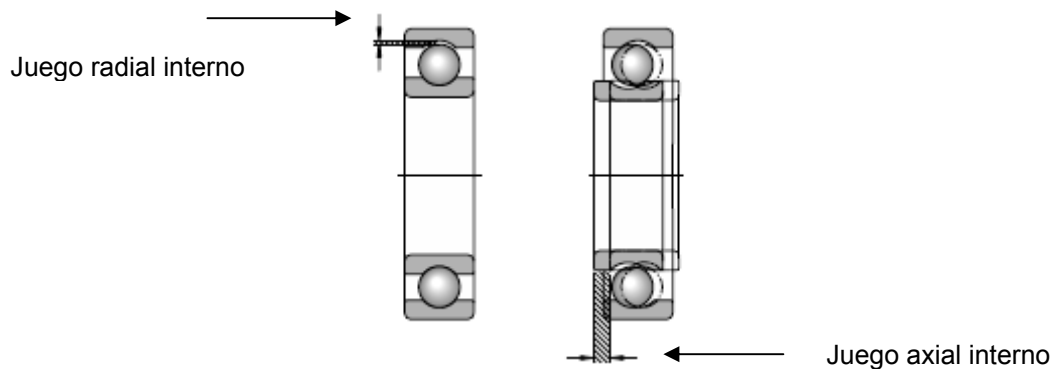
**Tabla XIV. Límites de dimensiones de chaflanes para rodamientos radiales de rodillos cónicos**

Dimensión mínima del chaflán individual	Diámetro nominal del agujero/exterior del rodamiento		Dimensiones máximas de chaflanes		
	$r_s$ mín	<b>d, D</b>		$r_{1,3}$	$r_{2,4}$
<b>Mm</b>	<b>mm</b>	más de	hasta incl.	máx	máx
<b>0.3</b>	-	40	-	0.7	1.4
	40	-	-	0.9	1.6
<b>0.6</b>	-	40	-	1.1	1.7
	40	-	-	1.3	2
<b>1</b>	-	50	-	1.6	2.5
	50	-	-	1.9	3
<b>1.5</b>	-	120	-	2.3	3
	120	250	-	2.8	3.5
	250	-	-	3.5	4
<b>2</b>	-	120	-	2.8	4
	120	250	-	3.5	4.5
	250	-	-	4	5
<b>2.5</b>	-	120	-	3.5	5
	120	250	-	4	5.5
	250	-	-	4.5	6
<b>3</b>	-	120	-	4	5.5
	120	250	-	4.5	6.5
	250	400	-	5	7
	400	-	-	5.5	7.5
<b>4</b>	-	120	-	5	7
	120	250	-	5.5	7.5
	250	400	-	6	8
	400	-	-	6.5	8.5
<b>5</b>	-	180	-	6.5	8
	180	-	-	7.5	9
<b>6</b>	-	180	-	7.5	10
	180	-	-	9	11

### 5.3 Juego interno del rodamiento

El juego interno del rodamiento se define como la distancia total que se puede desplazar un aro con respecto a otro en dirección radial (juego radial interno) o en dirección axial (juego axial interno), como se muestra en la figura 27.

**Figura 27. Juego radial y axial interno de un rodamiento**



Fuente: General Catalogue SKF

Es necesario distinguir entre el juego interno de un rodamiento antes del montaje, y el juego interno de un rodamiento montado, que ha alcanzado su temperatura de funcionamiento (juego de funcionamiento). El juego interno inicial (antes del montaje) es superior al juego de funcionamiento debido a que los diferentes grados de apriete en los ajustes y la dilatación térmica de los aros de rodamiento y de los componentes adyacentes dan lugar a una expansión o contracción de los aros.

El juego radial interno de un rodamiento es de considerable importancia para que el rodamiento pueda funcionar satisfactoriamente. Como regla

general, los rodamientos de bolas deben tener siempre un juego de funcionamiento casi nulo, o puede haber una ligera precarga. Por otra parte, los rodamientos de rodillos cilíndricos y de rodillos a rótula deben tener siempre cierto juego residual durante el funcionamiento, por pequeño que sea. Esto es también válido para los rodamientos de rodillos cónicos, excepto para las disposiciones de rodamientos que requiere rigidez, por ejemplo en los piñones de diferencial en los que los rodamientos se montan con un cierto grado de precarga.

Se ha seleccionado un juego interno denominado normal para obtener un juego de funcionamiento adecuado al montar los rodamientos con los ajustes normalmente recomendados y cuando las condiciones de funcionamiento son las normales. Cuando las condiciones de funcionamiento y las de montaje difieren de las normales, por ejemplo cuando se usan ajustes de interferencia para los dos aros de rodamiento, o cuando las temperaturas no son las habituales, se deberán seleccionar rodamientos con un juego interno mayor o menor que el normal. En estos casos, se recomienda comprobar el juego residual del rodamiento después de su montaje.

**Tabla XV. Designación complementaria para el juego interno**

<b>Sufijo</b>	<b>Juego interno</b>
<b>C1</b>	Menor que C2
<b>C2</b>	Menor que normal
<b>CN</b>	Normal, sólo utilizado en combinación con letras, indicando un rango de juego reducido o desplazado.
<b>C3</b>	Mayor que normal
<b>C4</b>	Mayor que C3
<b>C5</b>	Mayor que C4



#### **5.4 Materiales usados para los rodamientos**

El rendimiento y la fiabilidad de los rodamientos vienen determinados en gran medida por los materiales de los cuales se fabrican los componentes de los mismos. Entre las condiciones típicas para los aros y los elementos rodantes de los rodamientos se encuentran, la dureza para la capacidad de carga, la resistencia a la fatiga bajo condiciones de contacto de rodadura, bajo condiciones de lubricación limpias o contaminadas, y la estabilidad dimensional de los componentes del rodamiento. Entre las consideraciones para la jaula se incluyen, la fricción, la deformación, las fuerzas de inercia y en algunos casos, el efecto químico de determinados lubricantes, disolventes y refrigerantes.

La importancia relativa de estas consideraciones se puede ver afectada por otros parámetros de funcionamiento, como por ejemplo la corrosión, las temperaturas elevadas, las cargas de choque o la combinación de estas y otras condiciones,

Las obturaciones rozantes integradas en los rodamientos también pueden tener una considerable influencia en el rendimiento y la fiabilidad del rodamiento. Los materiales de los que están fabricadas deben ofrecer una excelente resistencia térmica, química y a la oxidación. En las aplicaciones en las que no se puede conseguir una lubricación suficiente o si se debe evitar el paso de corrientes eléctricas a través de los rodamientos, estos se deben utilizar rodamientos con recubrimientos especiales.

## **5.4.1 Materiales usados para los aros y elementos rodantes de los rodamientos**

### **5.4.1.1 Aceros de temple total**

El acero de temple total más comúnmente usado para los rodamientos es un acero al cromo rico en carbono, que contiene aproximadamente un 1% de carbono y un 1.5% de cromo según la normativa ISO 683-17:1999. Al día de hoy, el acero al cromo es uno de los aceros más antiguos y más investigados, debido a que las exigencias de duración de los rodamientos son cada vez mayores. La composición de este acero para rodamientos ofrece un equilibrio óptimo entre la fabricación y el rendimiento de la aplicación. Normalmente, este acero recibe un tratamiento térmico martensítico o bainítico, durante el cual se endurece hasta un rango de 58 a 65 HRC.

### **5.4.1.2 Aceros templados por corrientes de inducción**

El templado de la superficie por corrientes de inducción ofrece la posibilidad de temprar de forma selectiva el camino de rodadura de un componente sin que el resto del componente se vea afectado por este proceso. El grado del acero y el proceso de fabricación empleados antes del proceso de templado por corrientes de inducción, determinan las propiedades del área no afectada, lo que significa que se puede conseguir una combinación de propiedades en un componente.

Un ejemplo de esto sería una unidad de rodamientos para cubos de ruedas (HBU) con pestaña, donde las propiedades de la pestaña sin temprar han sido diseñadas para resistir la fatiga estructural, mientras que el camino de rodadura ha sido diseñado para resistir la fatiga de contacto por rodadura.

#### **5.4.1.3 Aceros de cementación**

Los aceros aleados al cromo-níquel y al cromo-manganeso según la normativa ISO 683-17:1999 con un contenido de carbono de aproximadamente el 0.15% son los aceros más utilizados para cementar los rodamientos.

En las aplicaciones en las que existen ajustes apretados de gran resistencia a la tracción y grandes cargas de choque, se recomienda utilizar rodamientos con aros y/o elementos rodantes cementados.

#### **5.4.1.4 Aceros inoxidables**

Los aceros inoxidables más utilizados para los aros y los elementos rodantes de los rodamientos son aquellos con un alto contenido de cromo X65Cr14 y X105CrMo17 según la normativa EN 10088-1:1995. Se debe advertir que, para ciertas aplicaciones, los recubrimientos resistentes a la corrosión pueden ser una buena alternativa al acero inoxidable.

#### **5.4.1.5 Aceros para rodamientos resistentes a las altas temperaturas**

Los rodamientos estándar hechos de aceros de temple total y de temple superficial tienen una temperatura de funcionamiento máxima recomendada, que varía entre 120 y 200°C dependiendo del tipo de rodamiento. La temperatura de funcionamiento máxima está directamente relacionada con el tratamiento térmico aplicado a los componentes durante su fabricación.

Para temperaturas de funcionamiento de hasta 250°C, se puede aplicar un tratamiento térmico especial llamado estabilización. En estos casos se debe tener en cuenta una reducción de la capacidad de carga del rodamiento.

Para los rodamientos que funcionan a temperaturas elevadas (más de 250°C) durante largos períodos de tiempo, se deben utilizar aceros hiperaleados, ya que conservan su dureza y las características de funcionamiento del rodamiento, incluso bajo las temperaturas más extremas.

## **5.4.2 Materiales para las jaulas**

### **5.4.2.1 Jaulas de chapa de acero**

La mayoría de las jaulas embutidas de chapa de acero están hechas de chapa de acero con un bajo contenido de carbono, laminado en caliente. Estas jaulas ligeras tienen una resistencia relativamente alta, y su superficie puede ser tratada para reducir en mayor medida la fricción y el desgaste.

### **5.4.2.2 Jaulas mecanizadas en acero**

Normalmente, las jaulas mecanizadas de acero están fabricadas con acero para construcciones sin aleación. Con el fin de mejorar las propiedades de deslizamiento y de resistencia al desgaste, la superficie de algunas jaulas mecanizadas de acero lleva un tratamiento.

Las jaulas mecanizadas de acero se usan para los rodamientos de gran tamaño o en aplicaciones en las que existe el riesgo de que se produzca una rotura por corrosión intergranular causada por una reacción química si se usara una jaula de latón. Las jaulas de acero se pueden utilizar a temperaturas de

funcionamiento de hasta 300°C. Estas jaulas no se ven afectadas por los lubricantes con base de aceite mineral o sintético que normalmente se utilizan en los rodamientos, ni por los disolventes orgánicos usados para limpiar los mismos.

#### **5.4.2.3 Jaulas de chapa de latón**

Las jaulas de chapa de latón se usan en algunos rodamientos pequeños y medianos. En las aplicaciones en las que se pueda producir una rotura por corrosión intergranular en la chapa del latón, como por ejemplo en los compresores para refrigeración que utilizan amoníaco, se debe utilizar en su lugar jaulas mecanizadas de latón o acero.

#### **5.4.2.4 Jaulas mecanizadas de latón**

La mayoría de las jaulas de latón están mecanizadas de latón moldeado o forjado. Estas jaulas no se ven afectadas por los lubricantes más comunes para rodamientos, incluyendo los aceites y grasas sintéticos, y se pueden limpiar usando disolventes orgánicos normales. Las jaulas de latón no se deben utilizar a temperaturas superiores a los 250°C.

#### **5.4.2.5 Jaulas de polímero**

Para la mayoría de las jaulas moldeadas por inyección se utiliza la poliamida 6.6. Este material, con o sin refuerzo de fibra de vidrio, se caracteriza por una combinación favorable de resistencia y elasticidad. Las propiedades mecánicas de los materiales poliméricos, como la resistencia y la elasticidad, dependen de la temperatura y están sometidas a cambios permanentes bajo las condiciones de funcionamiento, a esto se le denomina envejecimiento. Los

factores más importantes que contribuyen al envejecimiento son la temperatura, el tiempo y el medio (lubricante) al que se ve expuesto el polímero.

#### **5.4.2.6 Poliéter-éter-cetona (PEEK)**

El uso de PEEK reforzado con fibra de vidrio para las jaulas, se ha convertido en algo habitual, debido a los requisitos de altas velocidades, el uso de agentes químicos o las altas temperaturas. Las excepcionales propiedades del PEEK son una combinación de resistencia y flexibilidad, altas temperaturas de funcionamiento, una gran resistencia química y al desgaste y un buen funcionamiento. Este material no muestra síntomas de envejecimiento causado por temperaturas y aditivos de aceite hasta + 200°C. Sin embargo, la temperatura máxima para el uso a alta velocidad está limitada a + 150°C, ya que esta es la temperatura de reblandecimiento del polímero.

#### **5.4.2.7 Jaulas de resina fenólica**

Las jaulas de resina fenólica ligeras, reforzadas con tejido, pueden resistir grandes fuerzas centrífugas y de aceleración, pero no pueden soportar altas temperaturas de funcionamiento. En la mayoría de los casos, estas jaulas se usan, como estándar, en los rodamientos de bolas con contacto angular de alta precisión.

#### **5.4.3 Materiales para las obturaciones**

Normalmente las obturaciones están fabricadas con materiales elastoméricos. El tipo de material puede depender de la serie y del tamaño del rodamiento, así como de los requisitos de la aplicación.

### **5.4.3.1 Caucho nitrilo**

El caucho de butadieno acrilonitrilo (NBR) es el material “universal” para las obturaciones. Este copolímero, fabricado de acrilonitrilo y butadieno, muestra una buena resistencia a los siguientes medios:

- la mayoría de los aceites minerales y grasas con aceite base mineral
- combustibles normales: gasolina, diesel y petróleos ligeros para calefacción
- aceites y grasas animales y vegetales
- agua caliente.

También tolera el funcionamiento en seco del labio de obturación durante breves intervalos de tiempo. El margen de temperaturas de funcionamiento permisible es de -40 a +100°C. Durante breves períodos de tiempo puede tolerar temperaturas de hasta +120°C. A temperaturas más altas, el material se endurece.

### **5.4.3.2 Caucho nitrilo hidrogenado**

El caucho butadieno acrilonitrilo hidrogenado (HBNR) tiene unas características de desgaste considerablemente mejores que el caucho nitrilo, por lo que las obturaciones fabricadas con este material tienen una mayor duración. Asimismo, el caucho nitrilo hidrogenado es más resistente al calor, al envejecimiento y al endurecimiento en aceite caliente u ozono.

Las mezclas de aceite en el aire pueden perjudicar la duración de la obturación. El límite superior a la temperatura de funcionamiento es +150°C, considerablemente mejor que para el caucho nitrilo normal.

#### **5.4.3.3 Poliuretano**

El poliuretano (AU) es un material orgánico resistente al desgaste con buenas propiedades elásticas. Soporta temperaturas de funcionamiento de entre -20 y +80°C. Ofrece una buena resistencia a grasas con una base de aceite mineral, aceites minerales sin aditivos EP o con pocos aditivos EP, agua y mezclas de agua-aceite por ejemplo. No es resistente ácidos, álcalis o solutos polares.

#### **5.4.3.4 Caucho fluorado**

Los cauchos fluorados (FKM) se caracterizan por su alta resistencia térmica y química. Su resistencia al envejecimiento y al ozono es muy buena y su permeabilidad a los gases es muy ligera.

Tienen unas características de desgaste excepcionalmente buenas, incluso bajo condiciones adversas, y puedan soportar temperaturas de funcionamiento de hasta +200°C. Las obturaciones fabricadas de este material pueden tolerar el funcionamiento en seco del labio durante breves períodos de tiempo.

Asimismo, los cauchos fluorados son resistentes a los aceites y fluidos hidráulicos, combustibles y lubricantes, ácidos minerales y alifáticos, así como los hidrocarburos aromáticos que podrían causar fallos en las obturaciones fabricadas de otros materiales. No se deben utilizar cauchos fluorados en presencia de ésteres, éteres, cetonas, determinadas aminas e hidrof fluoruros anhídros calientes.



Los cauchos fluorados producen humos peligrosos a temperaturas superiores a los 300°C. Debido a que la manipulación de las obturaciones fabricadas con caucho fluorado constituye un posible riesgo para la salud, se deben tener siempre en cuenta las medidas de seguridad.

#### **5.4.4 Medidas de seguridad para el caucho fluorado**

En condiciones normales, hasta 200°C el caucho fluorado es un material muy estable e inofensivo. Sin embargo, si las obturaciones de caucho fluorado se exponen a temperaturas extremas superiores a 300°C, por ejemplo al fuego o a la llama de un soplete de corte, éstas producen humos peligrosos. Estos humos pueden ser dañinos si son inhalados, y también son perjudiciales para los ojos. Asimismo, la manipulación de las obturaciones es peligrosa una vez han sido calentadas hasta dichas temperaturas, incluso después de haberse enfriado, y no deben entrar en contacto con la piel.

Si es necesario manipular rodamientos con obturaciones de caucho fluorado que hayan sido sometidas a altas temperaturas, por ejemplo al desmontar el rodamiento, se deben observar las siguientes medidas de seguridad:

- Utilice siempre gafas protectoras, guantes y equipo de respiración adecuados.
- Coloque los restos de las obturaciones en un recipiente de plástico hermético señalizado con un símbolo que indique “material corrosivo”.
- Siga las medidas de seguridad suministradas con dichas obturaciones.

Si se produce un contacto involuntario con las obturaciones, lávese las manos con jabón y agua abundante, aclárese los ojos con agua abundando y

acuda inmediatamente a un médico. Si se han inhalado los humos, acuda inmediatamente a un médico.

#### **5.4.5 Recubrimientos**

El uso de recubrimientos es un método reconocido para mejorar los materiales y proporcionar a los rodamientos unas características adicionales para las condiciones específicas de las aplicaciones. Está el recubrimiento cerámico de baja fricción sobre las superficies interiores del rodamiento, que le permite soportar, por ejemplo, largos períodos de funcionamiento con una lubricación mínima. Otros recubrimientos, como por ejemplo el cromato de zinc, pueden ofrecer una alternativa al acero inoxidable en un entorno corrosivo, especialmente en las unidades de rodamiento listas para montar.

#### **5.5 Jaulas**

Las jaulas tienen una apreciable influencia en la adecuación de los rodamientos. Sus principales finalidades son:

- mantener a los elementos rodantes a una distancia adecuada entre sí y evitar el contacto directo entre los elementos rodantes cercanos, con el fin de mantener al mínimo la fricción y con ello la generación de calor
- mantener a los elementos rodantes distribuidos uniformemente alrededor de toda la circunferencia, con el fin de proporcionar una distribución uniforme de la carga y un funcionamiento silencioso y constante
- guiar a los elementos rodantes de la zona no cargada, con el fin de mejorar las condiciones de rodadura del rodamiento y evitar movimientos deslizantes dañinos

- si los rodamientos son de diseño desarmable, retener los elementos rodantes tras la retirada de uno de los aros del rodamiento durante su montaje o desmontaje.

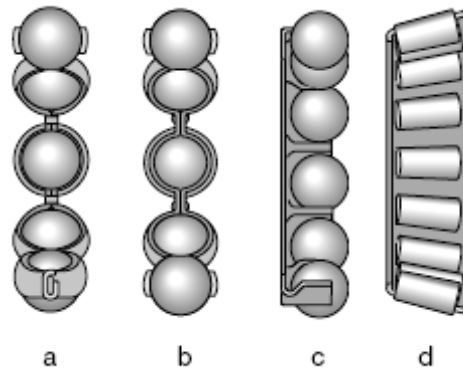
Las jaulas están sometidas a tensiones mecánicas por las fuerzas de fricción, de deformación y de inercia, también pueden estar sometidas a los efectos químicos de ciertos lubricantes, de los aditivos de los lubricantes o de los productos originados por el envejecimiento de los mismos, así como por disolventes orgánicos o refrigerantes. Por lo tanto, el diseño y el material son de primordial importancia para el rendimiento de la jaula, así como para la fiabilidad de funcionamiento del propio rodamiento.

#### **5.5.1 Jaulas embutidas**

Normalmente las jaulas embutidas están hechas de chapa de acero, con algunas excepciones de chapa de latón. Dependiendo del tipo de rodamiento, las jaulas embutidas están diseñadas como:

- a. Jaula embutida de chapa de latón o acero con lengüetas.
- b. Jaula remachada de acero.
- c. Jaula de latón o acero de montaje a presión.
- d. Jaula de tipo ventana de acero de gran resistencia.

**Figura 28. Tipos de jaula embutida**



Fuente: General Catalogue SKF

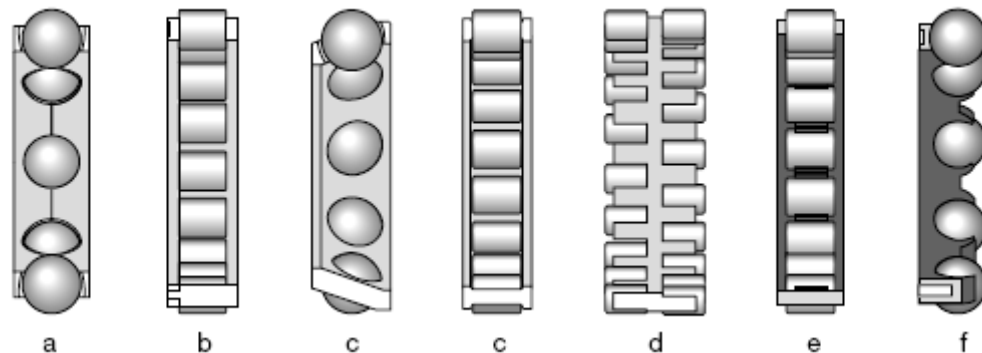
Las jaulas embutidas ofrecen la ventaja de pesar menos, y ofrecer un mayor espacio en el interior del rodamiento, lo que facilita la entrada del lubricante en el rodamiento.

### **5.5.2 Jaulas macizas**

Las jaulas macizas para los rodamientos están hechas de latón, acero, aleación ligera, polímero o resina fenólica reforzada con tejido. Dependiendo del diseño del rodamiento, están diseñadas como:

- a. Jaula mecanizada y remachada de dos piezas.
- b. Jaula mecanizada de dos piezas con remaches integrados.
- c. Jaula mecanizada enteriza de tipo ventana.
- d. Jaula mecanizada abierta de doble hilera.
- e. Jaula de polímero moldeada por inyección de tipo ventana.
- f. Jaula de polímero moldeada por inyección de montaje a presión.

**Figura 29. Tipos de jaulas macizas**



Fuente: General Catalogue SKF

Por lo general, las jaulas mecanizadas de metal permiten mayores velocidades, y son necesarias cuando existen movimientos adicionales superpuestos a la rotación pura, especialmente cuando prevalecen condiciones de gran aceleración. Se deben tomar las medidas necesarias (por ejemplo, lubricación aceite) para suministrar una cantidad adecuada del lubricante a las superficies guía de la jaula y al interior del rodamiento.

Las jaulas macizas de polímero se caracterizan por una favorable combinación de resistencia y elasticidad. Las buenas características de deslizamiento del polímero sobre las superficies de acero lubricadas y la lisura de las superficies de la jaula en contacto con los elementos rodantes producen una baja fricción, que reduce al mínimo la generación de calor y el desgaste del rodamiento. La baja densidad del material reduce la inercia de la jaula. Las excelentes características de funcionamiento de las jaulas de polímero con una lubricación escasa permiten que el rodamiento funcione durante algún tiempo sin riesgo de agarrotamientos o de otros daños secundarios.

### 5.5.3 Jaulas con pasadores

Las jaulas de acero con pasadores requieren el uso de rodillos perforados, y únicamente se utilizan con rodamientos de rodillos de gran tamaño. Estas jaulas tienen un peso relativamente bajo, y permiten la incorporación de un gran número de rodillos.

**Figura 30. Otros tipos de jaula**



Fuente: Timken Spherical Roller Bearing Interactive Catalog

## 5.6 Designaciones

Las designaciones de los rodamientos se dividen en dos grupos principales: designaciones para los rodamientos estándar y designaciones para los rodamientos especiales. Por regla general, los rodamientos estándar tienen dimensiones normalizadas, mientras que los rodamientos especiales tienen dimensiones especiales según las exigencias de los clientes. La designación completa puede componerse de una designación básica con o sin una o más de designaciones complementarias. La designación completa del rodamiento, es decir, la designación básica con las designaciones complementarias siempre se encuentra marcada en el embalaje del rodamiento, mientras que la designación marcada en el rodamiento puede ser incompleta debido a, por ejemplo, motivos relacionados con su fabricación.

Las designaciones básicas identifican:

- el tipo
- el diseño básico y
- las dimensiones principales estándar de un rodamiento.

Las designaciones complementarias identifican:

- los componentes del rodamiento y/o
- las variantes con un diseño y/o unas características que difieren de algún modo del diseño básico.

Las designaciones complementarias pueden ir colocadas delante de la designación básica (prefijos) o detrás de ella (sufijos). Si para identificar un rodamiento concreto se utilizan varias designaciones complementarias, éstas siempre van escritas en un orden determinado.

### **5.6.1 Designaciones básicas**

Todos los rodamientos estándar tienen una designación básica característica que por lo general se compone de 3, 4 ó 5 cifras o de una combinación de letras y cifras. En la figura 30 se muestra esquemáticamente el diseño del sistema usado para casi todos los rodamientos de bolas y de rodillos estándar. Las cifras y las combinaciones de letras y cifras tienen el siguiente significado:

- La primera cifra o la primera letra o combinación de letras identifica el tipo de rodamiento.

- Las dos siguientes cifras identifican la serie de dimensiones ISO; la primera cifra indica la serie e anchuras o de alturas y la segunda indica la serie de diámetros.
- Las últimas dos cifras de la designación básica ofrecen el código del tamaño del rodamiento; al multiplicarlo por 5 se obtiene el diámetro del agujero en milímetros.

Sin embargo, no existe ninguna regla sin excepciones. A continuación están las más importantes dentro del sistema de designación de los rodamientos.

- En algunos casos se omite la cifra para el tipo de rodamiento y/o la primera cifra de la identificación de la serie de dimensiones (ver figura 30).
- Para los rodamientos con un diámetro de agujero menor de 10 mm o igual o mayor de 500 mm, el diámetro del agujero generalmente se da en milímetros y no está codificado. La identificación del tamaño está separada del resto de la designación por medio de una barra inclinada.
- Los rodamientos con diámetros de agujero de 10, 12 , 15 y 17 mm tienen las siguientes identificaciones para el código de tamaño:
  - 00 =10 mm
  - 01 = 12 mm
  - 02 = 15 mm
  - 03 = 17 mm
- Para algunos rodamientos más pequeños con un diámetro de agujero inferior a los 10mm, como por ejemplo los rodamientos rígidos de bolas, de bolas a rótula y de bolas con contacto angular, el diámetro del agujero también se indica en milímetros (sin codificar) pero no va separado de la designación de la serie por medio de una barra inclinada.



- Los diámetros de los agujeros que se desvían del estándar, siempre se indican sin codificar, en milímetros con un máximo de tres decimales.

Esta identificación del diámetro del agujero es parte de la designación básica, y está separada de ésta por una barra inclinada.

**Tabla XVI. Códigos para la designación de los rodamientos**

<b>Código</b>	<b>Tipo de rodamiento</b>
<b>0</b>	Rodamientos de dos hileras de bolas con contacto angular
<b>1</b>	Rodamientos de bolas a rótula
<b>2</b>	Rodamientos de rodillos a rótula, rodamientos axiales de rodillos a rótula
<b>3</b>	Rodamientos de rodillos cónicos
<b>4</b>	Rodamientos rígidos de dos hileras de bolas
<b>5</b>	Rodamientos axiales de bolas
<b>6</b>	Rodamientos rígidos de una hilera de bolas
<b>7</b>	Rodamientos de una hilera de bolas con contacto angular
<b>8</b>	Rodamientos axiales de rodillos cilíndricos
<b>N</b>	Rodamientos de rodillos cilíndricos. Se utiliza una segunda y a veces una tercera letra para identificar el número de hileras o la configuración de las pestañas
<b>QJ</b>	Rodamientos de bolas de cuatro puntos de contacto
<b>T</b>	Rodamientos de rodillos cónicos según ISO 355-1977



## 5.6.2 Designaciones complementarias

### 5.6.2.1 Prefijos

Los prefijos se utilizan para identificar los componentes de un rodamiento y van generalmente seguidos por la designación del rodamiento completo, o para evitar confusiones con otras designaciones de rodamientos. Por ejemplo, se utilizan delante de las designaciones de los rodamientos de rodillos cónicos según el sistema descrito en la normativa 19 de ANSI/ABMA para los rodamientos en pulgadas (predominantemente).

- GS** Arandela de alojamiento de un rodamiento axial de rodillos cilíndricos
- K** Corona axial de rodillos cilíndricos
- L** Aro interior o exterior separado de un rodamiento desarmable
- R** Aro interior o exterior con rodillos de un rodamiento desarmable
- W** Rodamiento rígido de bolas de acero inoxidable
- WS** Arandela de eje de un rodamiento axial de rodillos cilíndricos

### 5.6.2.2 Sufijos

Los sufijos se emplean para identificar diseños o variantes que difieren de algún modo del diseño original, o que difieren del diseño estándar existente. A continuación se indican unos de los sufijos más utilizados en nuestro medio.

- AC** Rodamiento de una hilera de bolas con contacto angular con un ángulo de contacto de 25°
- CC** Rodamiento de rodillos a rótula con diseño C pero mejor guiado de los rodillos
- C1** Juego interno del rodamiento menor que normal C2
- C3** Juego interno del rodamiento mayor que normal C2

- GA** Rodamiento de una hilera de bolas con contacto angular de apareamiento universal. Dos rodamientos dispuestos espalda con espalda o cara con cara tendrán una ligera precarga antes del montaje
- H** Jaula de chapa de acero, de montaje a presión , templada
- LS** Obturación rozante de caucho nitrilo
- 2LS** Obturación rozante LS de ambos lados del rodamiento
- MA** Jaula mecanizada de latón, centrada en el aro exterior
- N** Ranura para anillo elástico en el aro exterior
- NR** Ranura para anillo elástico en el aro exterior, con el anillo correspondiente
- PH** Jaula de poliéter-éter-cetona (PEEK) moldeada por inyección
- RS** Obturación rozante de caucho nitrilo (NBR) con o sin refuerzo de chapa de acero de un lado del rodamiento
- 2RS** Obturación rozante RS (NBR) de ambos lados del rodamiento
- T** Jaula tipo ventana, de resina fenólica reforzada con tejido, centrada en los elementos rodante
- VH** Rodamiento completamente lleno de rodillos cilíndricos autoretenibles
- W33** Ranura anular y tres orificios de lubricación en el aro exterior
- Z** Placa de protección de chapa de acero a un lado del rodamiento
- 2Z** Placa de protección Z a ambos lados del rodamiento

## **6. APLICACIÓN DE LOS RODAMIENTOS**

### **6.1 Disposiciones de rodamientos**

Un componente giratorio de una máquina, por ejemplo un eje, generalmente precisa dos rodamientos para sostenerlo y fijarlo radial y axialmente respecto a la parte estacionaria de la máquina, por ejemplo un soporte. Dependiendo de la aplicación, la carga, la exactitud de giro requerida y las consideraciones económicas, la disposición puede constar de:

- rodamientos fijos y libres
- rodamientos apareados
- rodamientos “libres”.

#### **6.1.1 Disposiciones de rodamientos fijos y libres**

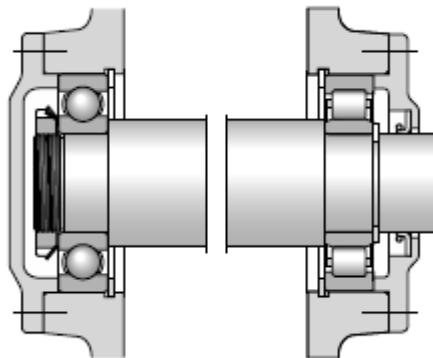
El rodamiento fijo en uno de los extremos del eje proporciona soporte radial y al mismo tiempo fija axialmente el eje en ambos sentidos. Por tanto, debe tener una fijación tanto en el eje como en el soporte. Los rodamientos radiales que soportan cargas combinadas son adecuados como rodamientos fijos, por ejemplo los rodamientos rígidos de bolas, los rodamientos de dos hileras de bolas o de una hilera de bolas apareados con contacto angular, los rodamientos de bolas a rótula, los rodamientos de rodillos a rótula o los rodamientos de rodillos cónicos apareados.

Las combinaciones de un rodamiento radial que puede soportar una carga puramente radial, por ejemplo un rodamiento de rodillos cilíndricos sin pestañas en un aro, con un rodamiento rígido de bolas, de bolas de cuatro puntos de contacto o axial de doble efecto, también puede servir de rodamiento

fijo. El segundo rodamiento proporciona entonces la fijación axial en ambos sentidos, pero debe ser montado en el soporte con libertad radial.

El rodamiento libre situado en el otro extremo del eje solo proporciona soporte radial. También debe permitir los desplazamientos axiales de manera que no se produzcan tensiones recíprocas entre los rodamientos, por ejemplo, cuando la longitud del eje varía debido a las dilataciones térmicas.

**Figura 32. Disposición de rodamiento rígido de bolas / rodamiento de rodillos cilíndricos**



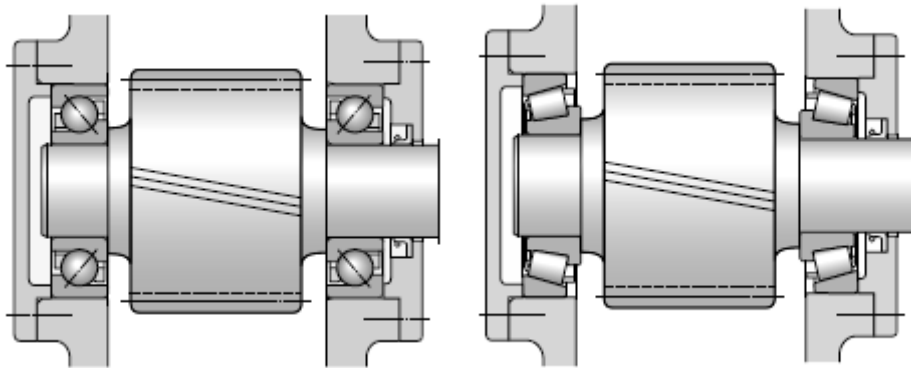
Fuente: General Catalogue SKF

### **6.1.2 Disposiciones de rodamientos apareados**

En las disposiciones de rodamientos apareados, el eje está fijado axialmente en un solo sentido por uno de los rodamientos, y en sentido opuesto del otro rodamiento. Este tipo de disposición se denomina “fijación cruzada” y se suele utilizar para ejes cortos. Entre los rodamientos adecuados se incluyen todos los rodamientos radiales que pueden soportar cargas axiales al menos en una dirección, incluyendo:

- rodamientos de bolas con contacto angular
- rodamientos de rodillos cónicos

**Figura 33. Disposición de rodamientos de bolas con contacto angular y de rodillos cónicos**



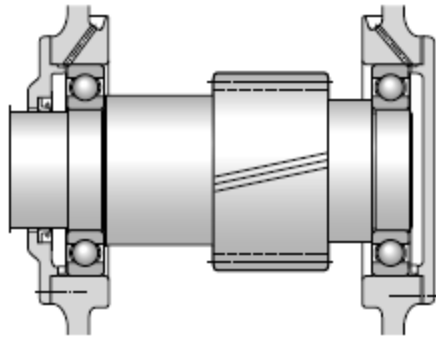
Fuente: General Catalogue SKF

### **6.1.3 Disposiciones de rodamientos “libres”**

Las disposiciones de rodamientos libres también tienen una fijación cruzada, y son adecuadas cuando las exigencias relacionadas con la fijación axial son moderadas o cuando otros componentes del eje sirven para fijarlo axialmente. Los rodamientos adecuados para este tipo de disposición son:

- rodamientos rígidos de bolas
- rodamientos de bolas a rótula
- rodamientos de rodillos a rótula

**Figura 34. Disposición de rodamientos rígidos de bolas**



Fuente: General Catalogue SKF

En estas disposiciones es importante que uno de los aros de cada uno de los rodamientos pueda moverse sobre o su asiento, preferiblemente el aro exterior en el rodamiento.

## **6.2 Fijación radial de rodamientos**

Para poder aprovechar al máximo la capacidad de carga de un rodamiento, sus aros o sus arandelas deben quedar apoyados en toda su circunferencia y en toda la anchura del camino de rodadura. El apoyo ha de ser firme y uniforme y se puede conseguir mediante un asiento cilíndrico o cónico, o en el caso de las arandelas de los rodamientos axiales mediante una superficie de apoyo plano. Esto significa que los asientos de los rodamientos deben tener la precisión adecuada y que su superficie no debe estar interrumpida por ranuras, agujeros ni ninguna otra irregularidad. Asimismo, los aros del rodamiento deben quedar montados de manera fiable para evitar que giren en sus asientos bajo carga.



En términos generales solo es posible obtener una fijación radial satisfactoria y un apoyo adecuado cuando los aros están montados con una interferencia apropiada. Si los aros de los rodamientos están fijados inadecuadamente, se suelen dañar los rodamientos y los componentes adyacentes. No obstante, cuando se requiere un montaje y desmontaje fácil no siempre puede utilizarse un ajuste de interferencia. En determinados casos en donde se emplea un ajuste flojo, es necesario adoptar precauciones especiales para limitar el inevitable desgaste producido por el deslizamiento, mediante el endurecimiento de la superficie del asiento y los resaltes del rodamiento, la lubricación de las superficies de contacto por medio de ranuras especiales de lubricación y la eliminación de las partículas de desgaste.

### **6.2.1 Selección del ajuste**

A la hora de seleccionar un ajuste, se deberán tener en cuenta los factores que se detallan a continuación:

#### **6.2.1.1 Condiciones de giro**

Las condiciones de giro hacen referencia al movimiento del aro del rodamiento con respecto a la dirección de la carga. En esencia pueden presentar tres tipos de condiciones diferentes: carga rotativa, carga estacionaria y cargas de dirección indeterminada.

Cuando la carga es rotativa el aro del rodamiento gira y la carga permanece estacionaria, o si el aro permanece estacionario la carga gira, de modo que todos los puntos del camino de rodadura están sometidos a la carga en el curso de una revolución. Las cargas elevadas que no giran, pero oscilan,

por ejemplo las que actúan en los rodamientos de bielas, se consideran generalmente como cargas rotativas.

El aro de un rodamiento sometido a una carga rotativa girará, sobre su asiento si está montado con un ajuste libre y el resultado será el desgaste de las superficies de contacto.

La carga es fija cuando el aro del rodamiento y la carga permanecen fijos, o si el aro y la carga giran a la misma velocidad, de manera que la carga siempre permanece en el mismo punto del camino de rodadura. En estas condiciones, el aro de rodamiento normalmente no girará sobre su asiento. Por tanto, no hace falta que el aro tenga un ajuste con interferencia a no ser que sea necesario por otros motivos.

Las cargas de dirección indeterminada representan las cargas externas variables, las cargas de choque, las vibraciones y el desequilibrio en máquinas de alta velocidad. Estas dan lugar a cambios en la dirección de la carga que no pueden describirse de un modo preciso.

Cuando la dirección de la carga es indeterminada y especialmente cuando se trata de una carga elevada es deseable que ambos aros estén montados con un ajuste de interferencia.

#### **6.2.1.2 Magnitud de la carga**

El ajuste de interferencia del aro interior de un rodamiento en su asiento se aflojará a medida que se incremente la carga, ya que el aro se deformará. Bajo una carga rotativa el aro comenzará a girar con respecto al eje. Por tanto, el grado de interferencia debe estar relacionado con la magnitud de la carga.

Cuanto mayor sea la carga mayor es el ajuste de interferencia requerido, también se deben tener en cuenta las cargas de choque y las vibraciones.

### **6.2.1.3 Juego interno del rodamiento**

El ajuste de interferencia de un rodamiento en el eje o en el alojamiento implica la deformación elástica del aro y la reducción del juego interno del rodamiento. No obstante, debe mantenerse cierto juego mínimo. El juego inicial y la reducción permisible dependen del tipo y del tamaño del rodamiento, la disminución del juego debido al ajuste de interferencia puede ser tan grande que se necesiten rodamientos con un juego mayor que el normal con el fin de evitar la precarga del rodamiento.

### **6.2.1.4 Temperatura**

En muchas aplicaciones el aro exterior tiene una temperatura de funcionamiento inferior a la del aro interior, esto puede causar una reducción del juego interno.

Durante el funcionamiento, los aros del rodamiento suelen alcanzar una temperatura superior a la de los ejes y alojamientos correspondientes, esto puede provocar el aflojamiento del ajuste del aro interior sobre su asiento, mientras que la expansión del aro exterior puede impedir el desplazamiento axial deseado del aro en su alojamiento. Un arranque rápido o la fricción de las obturaciones también pueden aflojar el ajuste del aro interior, por tanto, deben tenerse muy presentes los gradientes de temperatura y la dirección del flujo de calor al seleccionar los ajustes.

### 6.2.2 Ajustes recomendados

Para conseguir un ajuste de apriete o un ajuste flojo para los rodamientos con un agujero y un diámetro exterior cilíndrico, hay que seleccionar las tolerancias adecuadas para los asientos en el eje y en el alojamiento.

Los rodamientos con un agujero cónico se pueden montar directamente sobre el asiento de un eje cónico o bien sobre un manguito de fijación o de desmontaje, con un cono externo, en un eje cilíndrico. En estos casos el ajuste del aro interior del rodamiento no está determinado como en el caso de los rodamientos con el agujero cilíndrico por la tolerancia seleccionada para el eje, sino por el calado axial del rodamiento sobre su asiento cónico o sobre el manguito.

### 6.2.3 Ajuste para ejes huecos

Si los rodamientos han de ser montados con un ajuste de apriete sobre un eje hueco, suele ser necesario utilizar un apriete mayor que el que se utilizaría para un eje macizo, con el fin de obtener la misma presión entre el aro interior y el asiento del eje. Las siguientes relaciones de los diámetros son importantes a la hora de decidir el ajuste que se va a utilizar.

$$C_i = \frac{d_i}{d} \quad \text{y} \quad C_e = \frac{d}{d_e}$$

El ajuste sobre ejes huecos no se ve afectado de modo apreciable hasta que la relación de los diámetros del eje hueco  $C_i \geq 0.5$ . Si no se conoce el diámetro exterior medio del aro interior, se puede calcular la relación de diámetros  $C_e$  con suficiente precisión utilizando la siguiente ecuación

$$C_e = \frac{d}{k(D-d) + d}$$

donde:

$C_i$  = relación de diámetros del eje hueco

$C_e$  = relación de diámetros del aro interior del rodamiento

$d$  = diámetro exterior del eje hueco, mm

$d_i$  = diámetro interior del eje hueco, mm

$d_e$  = diámetro exterior medio del aro interior, mm

$D$  = diámetro exterior del rodamiento, mm

$k$  = un factor que depende del tipo de rodamiento para los rodamientos de bolas a rótula.

Para determinar el ajuste del apriete probable medio entre el asiento del eje y el agujero del rodamiento, que se calcula de las tolerancias recomendadas para un eje macizo del mismo diámetro. Sin tener en cuenta la deformación plástica de las superficies de ajuste producida durante el montaje, el apriete efectivo se puede considerar igual al apriete probable medio.

#### **6.2.4 Precisión dimensional, de forma y giro de asientos y resaltes para rodamientos**

La precisión de los asientos cilíndricos para los rodamientos en ejes y alojamientos, la precisión de los asientos para las arandelas de los rodamientos axiales y la precisión de las superficies de apoyo (resaltes para rodamientos proporcionados por los rebordes del eje y del alojamiento). Deben corresponder a la precisión de los rodamientos utilizados. A continuación se ofrecen valores recomendados para la precisión de las dimensiones, la forma y el giro. Estos valores deben ser considerados a la hora de mecanizar los asientos y los resaltes.

### 6.2.4.1 Tolerancias dimensionales

Para los rodamientos con tolerancias normales, la precisión de las dimensiones de los asientos debe ser al menos de grado 6 y en el alojamiento de grado 7 como mínimo. Cuando se emplean manguitos de fijación o de desmontaje, se pueden utilizar mayores tolerancias para los diámetros (grados 9 ó 10) que para los asientos de diámetros. Para rodamientos de mayor precisión, deberán usarse grados superiores acordes con la precisión requerida.

**Tabla XVII. Tolerancias del eje para rodamientos montados sobre manguitos**

Diámetro del eje		Tolerancias para el diámetro y la forma					
<b>d</b> Nominal		<b>h9</b> Desviaciones		<b>IT5</b>	<b>h10</b> Desviaciones		<b>IT</b>
más de	hasta incl.	sup.	inf.	máx.	sup.	inf.	máx.
mm		Mm					
<b>10</b>	<b>18</b>	02	-43	8	0	-70	18
<b>18</b>	<b>30</b>	0	-52	9	0	-84	21
<b>30</b>	<b>50</b>	0	-62	11	0	-100	25
<b>50</b>	<b>80</b>	0	-74	13	0	-120	30
<b>80</b>	<b>120</b>	0	-87	15	0	-140	35
<b>120</b>	<b>180</b>	0	-100	18	0	-160	40
<b>180</b>	<b>250</b>	0	-115	20	0	-185	46
<b>250</b>	<b>315</b>	0	-130	23	0	-210	52
<b>315</b>	<b>400</b>	0	-140	25	0	-230	57
<b>400</b>	<b>500</b>	0	-155	27	0	-250	63
<b>500</b>	<b>630</b>	0	-175	32	0	-280	70
<b>630</b>	<b>800</b>	0	-200	36	0	-320	80
<b>800</b>	<b>1000</b>	0	-230	40	0	-360	90
<b>1000</b>	<b>1250</b>	0	-260	47	0	-420	105

**Tabla XVIII. Grados de tolerancia ISO para dimensiones**

Dimensión nominal		Grados de tolerancia											
-----		IT1	IT2	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12
más de	hasta incl.	máx											
Mm		μm											
1	3	0.8	1.2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	100
3	6	1	1.5	2.5	4	5	8	12	18	30	48	75	120
6	10	1	1.5	2.5	4	6	9	15	22	36	58	90	150
10	18	1.2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	100	180
18	30	1.5	2.5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	210
30	50	1.5	2.5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	250
50	80	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	300
80	120	2.5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	350
120	180	3.5	5	8	12	18	25	40	63	100	160	250	400
180	250	4.5	7	10	14	20	29	46	72	115	185	290	460
250	315	6	8	12	16	23	32	52	81	130	210	320	520
315	400	7	9	13	18	25	36	57	89	140	230	360	570
400	500	8	10	15	20	27	40	63	97	155	250	400	630
500	630	-	-	-	-	32	44	70	110	175	280	440	700
630	800	-	-	-	-	36	50	80	125	200	320	500	800
800	1000	-	-	-	-	40	56	90	140	230	360	560	900
1000	1250	-	-	-	-	47	66	105	165	260	420	660	1050
1250	1600	-	-	-	-	55	78	125	195	310	500	780	1250
1600	2000	-	-	-	-	65	92	150	230	370	600	920	1500
2000	2500	-	-	-	-	78	110	175	280	440	700	1100	1750

### 6.2.4.2 Tolerancias para forma cilíndrica

Las tolerancias para la forma cilíndrica deben ser entre 1 y 2 grados IT superiores a la tolerancia dimensional recomendada, dependiendo de las exigencias. Por ejemplo, si el asiento de un rodamiento en el eje ha sido mecanizado con una tolerancia m6, la precisión de la forma deberá ser IT5 ó IT4. el valor de la tolerancia  $t_1$  para la cilindridad para un hipotético eje de 150 mm de diámetro será:  $t_1 = IT5/2 = 18/2 = 9\mu$ .

No obstante la tolerancia  $t_1$  corresponde a un radio, por tanto  $2 \times t_1$  se aplica para el diámetro del eje. Cuando los rodamientos van montados sobre manguitos de fijación o de desmontaje, la cilindridad del asiento del manguito deberá ser igual a IT5/2 (para h9) ó IT7/2 (para h10), (ver tabla XVII).

### 6.2.4.3 Tolerancias de asientos en ejes cónicos

Cuando un rodamiento se monta en el asiento de un eje cónico, la tolerancia del diámetro del asiento puede ser mas amplia que en el caso de los cilíndricos. La figura 34 muestra una tolerancia de grado 9, mientras que las estipulaciones de tolerancia son las mismas que en el asiento del eje cilíndrico.

La desviación permisible para la inclinación del cono es una tolerancia  $\pm$  según la IT7/2 y según la anchura del rodamiento B (ver figura 34). Y el valor se puede calcular usando la siguiente formula:

$$\Delta_k = IT7/2B$$

El margen permisible de dispersión (variación de la inclinación del cono) será entonces:

$$V_k = 1/k \pm IT/2B$$

donde:

$V_k$  = el margen permisible de dispersión para la inclinación del cono

$\Delta_k$  = la desviación permisible para la inclinación del cono

k = factor para el cono

12 para una conicidad 1:12

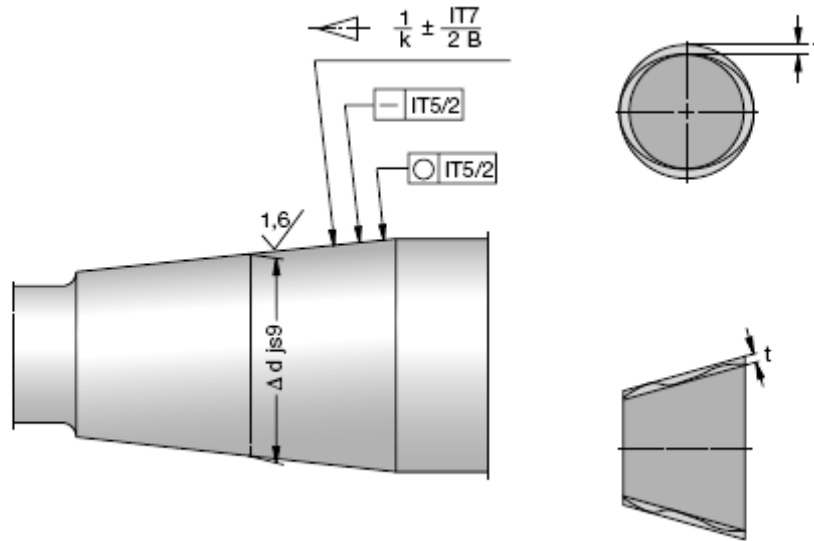
30 para una conicidad 1:30

B = anchura para el rodamiento, mm

IT7= el valor del grado de tolerancia basado en la anchura del rodamiento, mm



**Figura 35. Desviación permisible para la inclinación del cono**



Fuente: General Catalogue SKF

La tolerancia de rectitud es  $IT5/2$ , según el diámetro  $d$ , y se define como: “En cada plano axial a lo largo de la superficie cónica del eje, la zona de tolerancia está limitada por dos líneas paralelas con una distancia “ $t$ ” entre ellas.”

La desviación radial de redondez es  $IT5/2$  según el diámetro  $d$ , y se define como: “En cada plano radial a lo largo de la superficie cónica del eje, la zona de tolerancia está limitada por dos círculos concéntricos con una distancia “ $t$ ” entre ellos.” Cuando se requiere una exactitud de giro especialmente rigurosa, se debe aplicar  $IT4/2$  en su lugar.

El mejor método de comprobar que la conicidad está dentro de las tolerancias recomendadas es midiéndola con un comparador. Un método más práctico, pero menos preciso es utilizar anillos calibrados, calibres para conos o reglas de senos.

### **6.2.5 Rugosidad superficial de los asientos de los rodamientos**

La rugosidad superficial de los asientos de los rodamientos no afecta en el funcionamiento de éstos en el mismo grado que sus precisiones dimensionales de forma y giro. No obstante, cuanto más lisas sean las superficies de contacto, el ajuste de interferencia deseado se obtendrá con mayor precisión. Para las disposiciones de rodamientos menos críticas, se permiten grados de rugosidad superficial relativamente grandes.

### **6.2.6 Caminos de rodadura en ejes y alojamientos**

Para aprovechar al máximo su capacidad de carga, los caminos de rodadura mecanizados en los componentes adyacentes de los rodamientos de rodillos cilíndricos de un solo aro, y las coronas axiales de rodillos cilíndricos, deben tener una dureza superficial entre 58 y 64 HRC.

La rugosidad superficial debe ser  $R_a \leq 0.2 \mu\text{m}$  ó  $R_z \leq 1 \mu\text{m}$ . Para aplicaciones menos exigentes se pueden utilizar superficies con una menor dureza y mayor rugosidad.

El error de redondez y la desviación con respecto a la forma cilíndrica no deben superar el 25 y el 50% respectivamente de la tolerancia del diámetro real del camino de rodadura. Las variaciones axiales permisibles de los caminos de rodadura para las coronas axiales son las mismas que para el eje y las arandelas de alojamiento de los rodamientos axiales.

## **6.3 Fijación axial de rodamientos**

Un ajuste de interferencia, por sí solo no es apropiado para fijar axialmente el aro de un rodamiento. Por tanto, como regla general serán necesarios algunos sistemas adecuados para asegurar axialmente el aro.

Ambos aros de los rodamientos fijos se deben fijar axialmente a ambos lados. Sin embargo, para los rodamientos libres con un diseño no desarmable, el aro con el ajuste de mayor apriete (normalmente el aro interior) debe estar fijado axialmente, el otro aro debe quedar libre para moverse axialmente en su asiento.

Para los rodamientos libres de diseño desarmable, por ejemplo, los rodamientos de rodillos cilíndricos, ambos aros se deben fijar axialmente. Para los rodamientos con “fijación cruzada”, sólo se requiere fijar axialmente los aros del rodamiento de un lado.

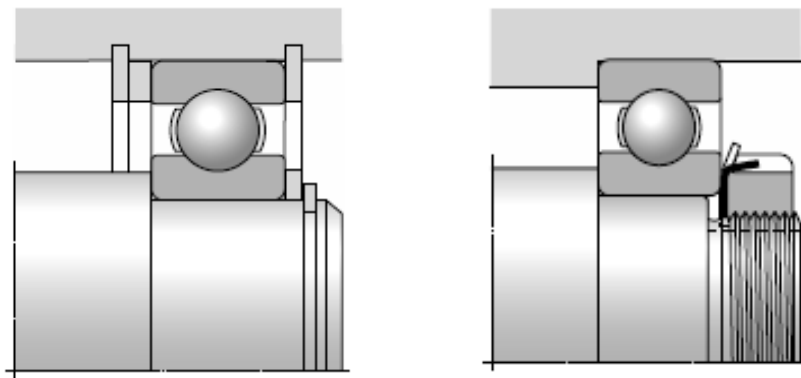
### **6.3.1 Métodos de fijación**

#### **6.3.1.1 Rodamientos con agujero cilíndrico**

Los aros de rodamientos con un ajuste de interferencia suelen apoyarse contra un resalte en el eje o en el alojamiento en uno de los lados. En el lado opuesto, los aros interiores se fijan normalmente con tuercas de fijación o mediante placas laterales situadas en el extremo del eje. Los aros exteriores suelen quedar retenidos por la tapa lateral del soporte o también en casos especiales por un aro roscado.

El uso de anillos elásticos para la fijación axial de los rodamientos ahorra espacio, permite un montaje y desmontaje rápidos y simplifica la mecanización de los ejes y alojamientos. El juego normal entre el anillo elástico y la ranura para el anillo elástico puede reducirse, se fuese necesario seleccionando las tolerancias adecuadas para el distanciador o mediante el uso de una arandela calibrada.

**Figura 36. Rodamientos axiales fijados con anillo elástico y con tuerca de fijación**



Fuente: General Catalogue SKF

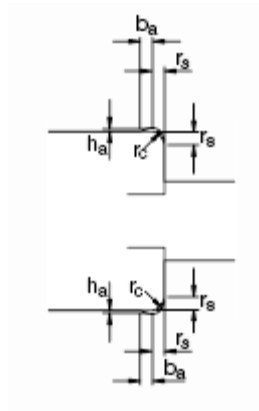
### **6.3.2 Acuerdos y resaltes**

Las dimensiones de los componentes adyacentes al rodamiento deben proporcionar un apoyo lo suficientemente grande para los aros del rodamiento, pero no debe haber contacto alguno entre las partes rotativas del rodamiento y los componentes estacionarios. El fabricante de los rodamientos deberá proporcionar las dimensiones más adecuadas para los acuerdos y resaltes.

La transición entre el asiento del rodamiento y el resalte del eje o del alojamiento puede tener la forma de un acuerdo sencillo según las dimensiones

$r_a$  y  $r_b$  en los datos del fabricante, o bien una garganta de desahogo. En la tabla XIX se muestran las dimensiones adecuadas para los acuerdos y en la figura 36 la disposición de los acuerdos con chaflanes.

**Figura 37. Disposición de los acuerdos con chaflanes**



Fuente: General Catalogue SKF

**Tabla XIX. Dimensiones adecuadas para los acuerdos de los chaflanes**

Dimensiones del chaflán del rodamiento	Dimensiones del acuerdo		
	$b_a$	$h_a$	$r_c$
$r_s$			
<b>Mm</b>	<b>Mm</b>		
<b>1</b>	2	0.2	1.3
<b>1.1</b>	2.4	0.3	1.5
<b>1.5</b>	3.2	0.4	2
<b>2</b>	4	0.5	2.5
<b>2.1</b>	4	0.5	2.5
<b>3</b>	4.7	0.5	3
<b>4</b>	5.9	0.5	4
<b>5</b>	7.4	0.6	5
<b>6</b>	8.6	0.6	6
<b>7.5</b>	10	0.6	7
<b>9.5</b>	12	0.6	9

Cuanto mayor sea el radio de acuerdo entre el eje cilíndrico y el resalte, más favorable será la distribución de tensiones. Por tanto, para ejes muy cargados se requiere normalmente un radio mayor. En dichos casos, se debe colocar un distanciador entre el aro interior y el resalte del eje para que la superficie de apoyo del aro interior sea suficientemente grande. El distanciador debe tener un chaflán o rebaje en la cara opuesta al resalte del eje para que no toque con el acuerdo.

#### **6.4 Diseño de los componentes adyacentes**

A menudo, particularmente cuando se trata de rodamientos de gran tamaño, es necesario tomar medidas durante la fase del diseño de la disposición de rodamientos para facilitar el montaje y desmontaje de éstos o incluso para posibilitarlo. Si por ejemplo hay ranuras o rebajes mecanizados en los bordes del eje y/o del alojamiento, es posible aplicar herramientas de desmontaje. Los orificios roscados en los rebordes de alojamiento también permiten el uso de tornillos para extraer el rodamiento de su asiento.

Si se va a utilizar el método de inyección de aceite para montar o desmontar los rodamientos en un asiento cónico, o para desmontar los rodamientos en un asiento cilíndrico, es necesario equipar el eje con conductos y ranuras. La distancia entre la ranura de distribución del aceite y el lado del rodamiento desde el que va a realizar el montaje o el desmontaje debe ser aproximadamente de una tercera parte de la ranura del asiento.

#### **6.5 Precarga de rodamientos**

Dependiendo de la aplicación puede que sea necesario que la disposición de rodamientos disponga de un juego de rodamientos positivo o

negativo. En la mayoría de las aplicaciones, el juego de funcionamiento debe ser positivo, es decir, al girar el rodamiento debe tener un juego residual determinado por pequeño que este sea.

Sin embargo, hay muchos casos en los que es preferible un juego de funcionamiento negativo, es decir una precarga, con el objeto de aumentar la rigidez de la disposición de rodamientos o incrementar la exactitud de giro. Tal es el caso de los husillos para máquina herramienta, los rodamientos de piñón para las transmisiones de automóviles, las disposiciones de rodamientos de motores eléctricos pequeños, o las disposiciones de rodamientos para movimientos oscilantes. También se recomienda la aplicación de una precarga, por ejemplo mediante muelles, en aquellos casos en los que los rodamientos tienen que girar sin carga o bajo una carga muy ligera y a altas velocidades. En estos casos la precarga sirve para asegurar la aplicación de una carga mínima sobre el rodamiento a objeto de evitar que éste se dañe como consecuencia de movimientos deslizantes de los elementos rodantes.

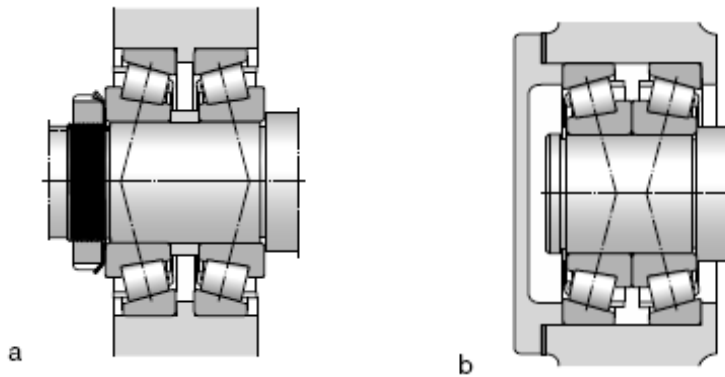
### **6.5.1 Tipos de precarga**

Dependiendo del tipo de rodamiento la precarga puede ser radial o axial. Por ejemplo, los rodamientos de rodillos cilíndricos debido a su diseño únicamente pueden ser precargados radialmente y los rodamientos axiales de bolas y axiales de rodillos cilíndricos únicamente se pueden precargar axialmente.

Los rodamientos de una hilera de bolas con contacto angular y los rodillos cónicos, que normalmente están sometidos a una precarga axial, se

montan generalmente junto a un segundo rodamiento del mismo tipo en una disposición espalda con espalda (a) o cara con cara (b).

**Figura 38. Rodamiento montado con un segundo del mismo tipo**



Fuente: General Catalogue SKF

Por lo general los rodamientos rígidos de bolas también están precargados axialmente, para esto los rodamientos deben tener un juego radial interno mayor que el normal (por ejemplo C3) de modo que como con los rodamientos de bolas con contacto angular se produzca un ángulo de contacto mayor que cero. Tanto para los rodamientos de rodillos cónicos como para los de bolas de contacto angular, la distancia  $L$  entre los centros de presión es mayor cuando los rodamientos están dispuestos espalda con espalda y menor cuando están dispuestos cara con cara.

Esto implica que los rodamientos dispuestos espalda con espalda pueden soportar momentos flectores relativamente grandes, incluso si la distancia entre los centros de los rodamientos es relativamente corta. Las fuerzas radiales resultantes del momento y la deformación causadas por éstas



en los rodamientos de esta disposición son menores que cuando los rodamientos se disponen cara con cara.

Si durante el funcionamiento el eje se calienta más que el alojamiento la precarga ajustada a temperatura ambiente durante el montaje se incrementará, siendo este incremento mayor para las disposiciones cara con cara que para las disposiciones espalda con espalda. En ambos casos, la dilatación térmica en sentido radial sirve para reducir el juego o incrementar la precarga.

### **6.5.2 Efectos de la precarga del rodamiento**

Las razones principales por las cuales se precarga un rodamiento son para:

- aumentar la rigidez
- reducir el ruido durante el funcionamiento
- aumentar la exactitud del guiado del eje compensar el desgaste y el asentamiento debido al funcionamiento
- proporcionar una larga vida útil.

#### **6.5.2.1 Mayor rigidez**

La rigidez del rodamiento se define como la relación entre la fuerza que actúa sobre el rodamiento y la deformación elástica que produce en él. Las deformaciones elásticas causadas por una carga dentro de una determinada gama de valores, son mas pequeñas en los rodamientos precargados que en los rodamientos sin precargar.

### **6.5.2.2 Funcionamiento silencioso**

Cuanto menor sea el juego en funcionamiento de un rodamiento, mejor será el guiado de los elementos rodantes en la zona sin carga y más silencioso será el funcionamiento del rodamiento.

### **6.5.2.3 Precisión en el guiado del eje**

Los rodamientos precargados ofrecen un guiado del eje más preciso, debido a que la precarga reduce la flexión del eje bajo la acción de la carga. Por ejemplo, la máxima precisión de guiado y máxima rigidez alcanzadas con los rodamientos de piñón y diferencial precargados implican una mayor precisión y uniformidad en el engrane lo que mantiene las fuerzas dinámicas adicionales a niveles reducidos. Por tanto, se consigue un funcionamiento silencioso y se prolonga la duración de los engranajes.

### **6.5.2.4 Compensación del desgaste y el asentamiento**

Los procesos de desgaste y asentamiento en una disposición de rodamientos durante su funcionamiento incrementan el juego, pero este incremento se puede compensar mediante una precarga.

### **6.5.2.5 Mayor vida útil**

En determinadas aplicaciones, la precarga de los rodamientos puede mejorar la fiabilidad de un funcionamiento y prolongar la vida útil. Una precarga correctamente dimensionada puede favorecer la distribución de la carga en los rodamientos y por tanto puede también prolongar su vida útil.

### **6.5.3 Determinación de la fuerza de la precarga**

La precarga puede ser expresada como una fuerza o una trayectoria, aunque es la fuerza de la precarga el principal factor de especificación. Dependiendo del método de ajuste empleado la precarga también está directamente relacionada con el par de fricción en el rodamiento.

Se pueden obtener valores empíricos para la fuerza óptima de precarga partiendo de diseños anteriores. Para los nuevos diseños se recomienda calcular la fuerza de precarga y comprobar su precisión mediante pruebas, debido a que, por lo general, no se conocen con exactitud todos los factores que influyen en funcionamiento real del rodamiento, puede que sea necesario realizar correcciones en la práctica.

A la hora de determinar la precarga se debe calcular en primer lugar la fuerza de precarga requerida para conseguir una combinación óptima de rigidez, vida de rodamiento y fiabilidad de funcionamiento. A continuación, se calcula la fuerza de precarga que se deberá utilizar en el momento de ajustar los rodamientos durante su montaje. Durante el montaje, los rodamientos deben estar a temperatura ambiente y no estar sometidos a ninguna carga de funcionamiento.

La precarga adecuada a la temperatura normal de funcionamiento depende de la carga del rodamiento. Los rodamientos de bolas con contacto angular o los rodamientos de rodillos cónicos pueden soportar cargas radiales y axiales simultáneamente. Bajo una carga radial se producirá en el rodamiento una fuerza que actúa en dirección axial y que por lo general debe ser soportada por un segundo rodamiento en oposición al primero.

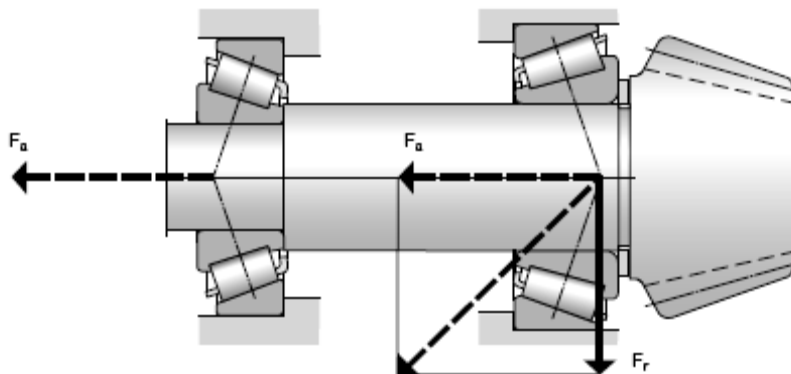
Un desplazamiento puramente radial entre los aros del rodamiento implica que la mitad de la circunferencia del rodamiento (es decir, la mitad de los elementos rodantes) está sometida a la carga y la fuerza axial producida en el rodamiento se determina por:

$F_a = RF_r$  para los rodamientos de una hilera de bolas con contacto angular, o

$F_a = 0.5F_r/Y$  para los rodamientos de una hilera de rodillos cónicos

donde  $F_r$  es la carga radial aplicada al rodamiento.

**Figura 39. Dirección de las fuerzas de precarga en los rodamientos**



Fuente: General Catalogue SKF

Cuando un único rodamiento está sometido a una carga radial  $F_r$  debe aplicarse una fuerza axial externa  $F_a$  según las fórmulas anteriores, para cumplir con el requisito previo a la capacidad de carga básica (la mitad de la circunferencia del rodamiento bajo carga).

Si la fuerza externa aplicada es menor, el número de elementos rodantes que soportara la carga será menor, con la consiguiente reducción de la capacidad de carga del rodamiento.

#### **6.5.4 Procedimientos de ajuste**

Por ajuste se entiende la regulación del juego interno del rodamiento o la regulación de la precarga de una disposición de rodamientos.

La precarga radial normalmente utilizada para los rodamientos de rodillos cilíndricos, de dos hileras de bolas con contacto angular y en ocasiones para los rodamientos rígidos de bolas, se consigue utilizando un grado de interferencia suficiente para uno o ambos aros del rodamiento, con el fin de reducir a cero el juego interno inicial del rodamiento, de modo que durante el funcionamiento exista un juego negativo, es decir, una precarga.

Los rodamientos con agujero cónico son especialmente adecuados para la carga radial ya que calculando el rodamiento en su asiento cónico, se puede aplicar la precarga dentro de unos límites estrechos.

La precarga axial en los rodamientos de una hilera de bolas con contacto angular, los rodamientos de rodillos cónicos, y también los rodamientos rígidos de bolas se produce mediante el desplazamiento axial de los aros de rodamiento en la magnitud correspondiente a la fuerza de precarga deseada. Hay tres grupos principales de métodos de ajuste que se diferencian entre sí por sus principios básicos: el ajuste individual, ajuste usando la trayectoria de la precarga y el ajuste colectivo.

##### **6.5.4.1 Ajuste individual**

En el ajuste individual, cada una de las disposiciones de rodamientos se ajusta independientemente usando tuercas, chapas calibradas, casquillos distanciadores o manguitos deformables. Y los procedimientos de medición y de

inspección aseguran la obtención de la precarga nominal establecida con la desviación mínima posible. Existen diferentes métodos dependiendo de la cantidad de rodamientos a medir:

- ajuste usando la trayectoria de la precarga
- ajuste usando el par de fricción
- ajuste empleando la medición directa de la fuerza.

El ajuste individual ofrece la ventaja de poder producir componentes individuales con tolerancias normales y conseguir la precarga deseada con un grado de precisión razonablemente bueno.

#### **6.5.4.2 Ajuste usando la trayectoria de la precarga**

Este método de ajuste se emplea frecuentemente cuando se pueden premontar los componentes de la disposición de rodamientos. Para una disposición de rodamientos de piñón, por ejemplo, la precarga se consigue de la siguiente forma:

- Colocando aros intermedios entre los aros exterior e interior de los dos rodamientos.
- Insertando chapas calibradas entre el resalte de un alojamiento y un aro exterior o entre la carcasa y el alojamiento, en este caso el alojamiento es la inserción en ángulo con pestañas.
- Colocando un anillo distanciador entre un resalte del eje y el aro interior de uno de los rodamientos o entre los aros interiores de los dos rodamientos.

### **6.5.4.3 Ajuste colectivo**

Este método de ajuste también puede denominarse “ajuste estadístico aleatorio”, porque los rodamientos, ejes, soportes, anillos distanciadores o manguitos, se producen en cantidades normales y se montan aleatoriamente como componentes que son totalmente intercambiables.

En lo que a rodamientos cónicos se refiere, esta intercambiabilidad se extiende también a los aros exterior e interior. Para no tener que recurrir a una producción poco rentable de rodamientos y componentes adyacentes de alta precisión, se supone que, estadísticamente los valores límites de las tolerancias rara vez coinciden. Sin embargo, para poder obtener la fuerza de precarga con menor dispersión posible se deberán reducir las tolerancias de fabricación. La ventaja del ajuste colectivo es que no precisa una inspección, ni el uso de equipos adicionales durante el montaje de los rodamientos.

### **6.5.5 Precarga mediante muelles**

En motores eléctricos pequeños y en aplicaciones similares, el ruido que provoca al funcionar se puede reducir precargando los rodamientos. La disposición de rodamientos en estos casos consta de un solo rodamiento rígido de una hilera de bolas en cada extremo del eje.

El método más simple para aplicar la precarga consiste en el uso de un muelle o un conjunto de muelles. El muelle actúa sobre el aro exterior de uno de los dos rodamientos que deberá poder desplazarse en sentido axial. La fuerza de la precarga permanece prácticamente constante aunque el rodamiento se desplace axialmente a causa de la dilatación térmica

El uso de muelles es también un método comúnmente empleado para aplicar la precarga a los rodamientos de bolas con contacto angular en husillos de gran velocidad para rectificadoras. No obstante, este método no es adecuado para aplicaciones de rodamientos que requieran un alto grado de rigidez o disposiciones en las cuales cambie la dirección de la carga o puedan producirse cargas de choque indefinidas.

#### **6.5.6 Mantenimiento de la precarga adecuada**

Cuando se selecciona la fuerza de precarga para una disposición de rodamientos, se debe tener presente que la rigidez sólo aumenta ligeramente cuando la precarga sobrepasa un valor óptimo determinado, mientras que la fricción, y por tanto, la generación de calor crece y la duración del rodamiento cae drásticamente a causa de la carga adicional que actúa constantemente.

Es importante que a la hora de precargar los rodamientos de una disposición, se consiga una fuerza de precarga determinada mediante cálculos o por la experiencia con el menor error posible.

Para disposiciones de rodamientos de rodillos cónicos, por ejemplo, esto significa que para los rodamientos se deben girar alternativamente en ambos sentidos durante el ajuste, con objeto de que los rodillos no se inclinen y para que la cabeza de los rodillos mantenga el contacto adecuado con la pestaña guía del aro exterior. De no hacerse esto, los resultados obtenidos de las inspecciones o de las mediciones, serán falsos y la precarga final obtenida puede ser muy inferior al valor requerido.



### **6.5.7 Rodamientos para disposiciones de rodamientos precargados**

Para determinadas aplicaciones de rodamientos individuales o conjuntos de rodamientos apareados, existen rodamientos especialmente diseñados para un ajuste más sencillo y fiable, de modo que al montarlos se asegura de un precarga previamente determinada. Entre estos rodamientos figuran:

- Los rodamientos de rodillos cónicos para disposiciones de rodamientos de piñón y de diferencial en automóviles.
- Rodamientos de una hilera de bolas con contacto angular para un apareamiento universal.
- Rodamientos de una hilera de rodillos cónicos apareados, por ejemplo, para cajas de engranajes industriales.
- Rodamientos rígidos de una hilera de bolas apareados.

### **6.6 Disposiciones de obturaciones**

Cualquiera que sea la disposición de rodamientos, ésta consiste no solo en los rodamientos sino que también incluye otros componentes adyacentes. Aparte de ejes y soportes, entre estos componentes adyacentes se incluyen las obturaciones, cuyo rendimiento es vital para la limpieza del lubricante y la vida útil de la disposición de rodamientos en general. Esto implica que la disposición de rodamientos y obturaciones debe ser considerada como un sistema integrado y debe ser tratado como tal.

En lo que a obturaciones de rodamientos se refiere, hay que distinguir entre obturaciones integradas en el rodamiento y las que se colocan en su exterior sin formar parte del mismo. Los rodamientos obturados se usan

generalmente donde no se puede contar con una obturación externa eficaz, debido a que el espacio es inadecuado o por motivos económicos.

### **6.6.1 Tipos de obturaciones**

La finalidad de la obturación es evitar la entrada de contaminantes en el rodamiento. Las obturaciones externas deben poder evitar que los contaminantes sólidos pasen entre una superficie estacionaria y una superficie giratoria, por ejemplo un soporte y un eje.

Las obturaciones integrales de rodamientos deben poder mantener los contaminantes alejados de la cavidad del rodamiento y el lubricante dentro de la misma.

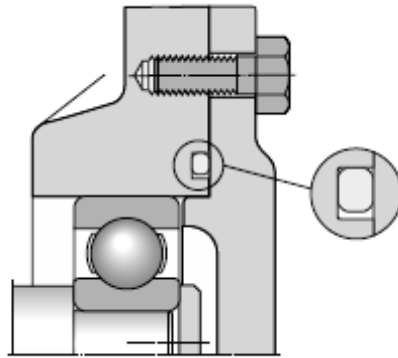
Para ser eficaz la obturación debe tener una capacidad de deformación suficiente con el fin de poder compensar las irregularidades de la superficie, pero también debe ser suficientemente fuerte para soportar las presiones causadas durante el funcionamiento. El material del que está hecha la obturación también debe poder soportar un alto margen de temperaturas de funcionamiento y tener una resistencia química adecuada. Existen distintos tipos de obturaciones, DIN 3750 distingue los siguientes tipos básicos:

- Obturaciones rozantes con superficies estacionarias.
- Obturaciones rozantes con superficies de deslizamiento.
- Obturaciones no rozantes.
- Fuelles y membranas.

Las obturaciones rozantes con superficies estacionarias se conocen como obturaciones estáticas y su eficacia depende de la deformación radial o

axial de su sección transversal una vez montadas. Algunos ejemplos típicos de obturaciones estáticas son las juntas y los anillos tóricos.

**Figura 40. Anillo tórico**

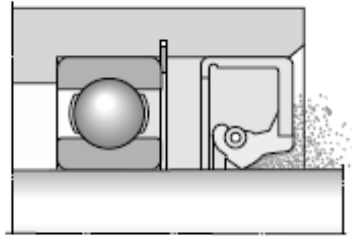


Fuente: General Catalogue SKF

Las obturaciones rozantes con superficies de deslizamiento se denominan obturaciones dinámicas y se usan para obturar los conductos entre los componentes de una máquina que se mueven entre sí, ya sea en dirección lineal o circunferencial. Estas obturaciones dinámicas deben retener el lubricante e impedir la entrada de contaminantes, separar los diferentes medios y soportar las diferencias de presión.

Existen varios tipos de obturaciones dinámicas, incluyendo los anillos de empaquetadura y de pistón, que se utilizan para movimientos u oscilantes. Sin embargo, la obturación más común es la obturación radial de eje, que se usa en gran variedad de aplicaciones en todos los sectores de la industria.

**Figura 41. Obturación radial de eje**



Fuente: General Catalogue SKF

Las obturaciones radiales de eje no rozantes funcionan gracias al efecto de obturación de un intersticio estrecho y relativamente largo que puede tener una posición axial, radial o combinada. Las obturaciones no rozantes, que van desde obturaciones de tipo intersticio sencillas hasta laberínticas en múltiples etapas, no tienen prácticamente ningún rozamiento ni desgaste.

### **6.6.2 Selección del tipo de obturación**

Las obturaciones para las disposiciones de rodamientos deben producir una fricción y un desgaste mínimo, ofreciendo la máxima protección incluso bajo las condiciones más severas. Debido a que el rendimiento y la vida del rodamiento están estrechamente ligados a la eficacia de la obturación, la influencia de los contaminantes sobre la vida del rodamiento es un factor clave a la hora de diseñar una obturación.

A la hora de seleccionar la obturación más adecuada para una disposición de rodamientos en particular, se deben considerar muchos factores, tales como:

- El tipo de lubricante (aceite o grasa).
- La velocidad periférica (circunferencial)
- La disposición del eje (horizontal o vertical)
- La posible desalineación del eje
- El espacio disponible
- La fricción de la obturación y el aumento de temperatura correspondiente
- Las influencias ambientales
- Las razones económicas.

Seleccionar la obturación adecuada es de vital importancia para que el rodamiento pueda funcionar correctamente. Por consiguiente, se deben especificar los requisitos de obturación y se deben definir las condiciones externas con la mayor precisión posible.

### **6.6.3 Obturaciones integrales**

Existen varios tipos de rodamientos equipados con placas de protección u obturaciones rozantes en uno o ambos lados. Estos rodamientos ofrecen una solución económica y compacta para los problemas de obturación. Los rodamientos con placas de protección u obturaciones a ambos lados se suministran lubricados con grasa y generalmente son libres de mantenimiento.

#### **6.6.3.1 Rodamientos con placas de protección**

Los rodamientos equipados con placas de protección se utilizan en disposiciones donde la contaminación no es fuerte ni existe riesgo de que el rodamiento entre en contacto con agua, vapor o algún otro contaminante. Las placas de protección también se utilizan en aplicaciones que requieren un bajo

rozamiento por razones de velocidad o de temperatura de funcionamiento del rodamiento.

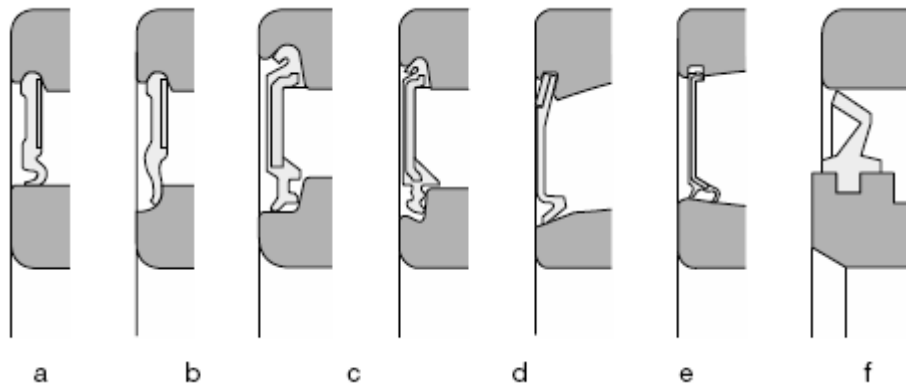
Las placas de protección están hechas de chapa de acero y forman un largo intersticio de obturación con la superficie del reborde del aro interior o una obturación laberíntica eficaz con un rebaje en el reborde del aro interior.

### **6.6.3.2 Rodamientos con obturaciones rozantes**

Los rodamientos equipados con obturaciones rozantes denominadas simplemente obturaciones, se usan preferentemente para disposiciones en entornos moderadamente contaminados o húmedos, así como cuando se precisa una larga vida útil sin mantenimiento. Dependiendo de su tipo y/o tamaño, los rodamientos pueden estar equipados con obturaciones estándar que obturan contra:

- el reborde del aro interior (a)
- contra un rebaje en el reborde del aro interior (b , c)
- la entrada en los laterales del camino de rodadura del aro interior (d, e)
- el aro exterior (f).

**Figura 42. Obturaciones rozantes estándar**



Fuente: General Catalogue SKF

#### **6.6.4 Obturaciones externas**

Para las disposiciones de rodamientos en las que la eficacia de la obturación bajo determinadas condiciones de funcionamiento es más importante que las consideraciones de espacio o de coste, existen varias obturaciones entre las cuales elegir.

##### **6.6.4.1 Obturaciones no rozantes**

La obturación más sencilla utilizada en el exterior del rodamiento es la obturación de tipo intersticio, que consiste en dejar un pequeño intersticio entre el eje y el alojamiento.

La eficiencia de esta obturación puede aumentarse mecanizando una o más ranuras concéntricas en el agujero de la tapa de salida del eje. La grasa que sale por el intersticio llena las ranuras y contribuye a evitar la entrada de contaminantes.

Cuando se lubrica con aceite y para ejes horizontales, pueden disponerse, en el eje o en su agujero de paso, ranuras helicoidales a derechas o izquierdas, según sea el sentido de giro del eje. Estas ranuras sirven para hacer retornar el aceite emergente al rodamiento. Con esta disposición es esencial que no cambie el sentido de rotación del eje.

#### **6.6.4.2 Obturaciones rozantes**

Las obturaciones radiales de eje son obturaciones rozantes que se usan sobre todo para disposiciones de rodamientos lubricadas con aceite. Son obturaciones de elastómero listas para montar y normalmente tienen un refuerzo metálico o carcasa. El labio de obturación suele ser de caucho sintético y generalmente queda ajustado a presión contra la superficie de obturación en el eje por un muelle toroidal. Según el material de la obturación y el medio a retener o excluir, se pueden utilizar obturaciones radiales de eje a temperaturas comprendidas entre -60 y +190°C.

El contacto entre el labio de obturación y la superficie de contacto es de vital importancia para su eficiencia. La dureza superficial de la superficie de contacto debe ser normalmente de 55HRC como mínimo y el espesor de la superficie endurecida debe ser como mínimo de 0.3mm. La rugosidad superficial debe estar dentro de los límites de  $R_a = 0.2$  a  $0.8\mu\text{m}$ .

En las aplicaciones con bajas velocidades, una buena lubricación y una contaminación mínima, se puede aceptar una menor dureza que la antes mencionada. Para evitar la acción de bombeo debida a las marcas helicoidales de rectificado, se recomienda el rectificado frontal.



## **7. LUBRICACIÓN DE LOS RODAMIENTOS**

### **7.1 Lubricación**

Para que los rodamientos funcionen de un modo fiable, deben estar adecuadamente lubricados con el fin de evitar el contacto metálico directo entre los elementos rodantes, los caminos de rodadura y las jaulas. El lubricante también evita el desgaste y protege las superficies contra la corrosión. Por tanto, la elección del lubricante y del método de lubricación adecuado para cada aplicación, así como el mantenimiento adecuado son de gran importancia.

Existe una extensa gama de grasas y aceites disponibles para la lubricación de los rodamientos y también existen lubricantes sólidos para, por ejemplo, temperaturas extremas.

La selección del lubricante depende fundamentalmente de las condiciones de funcionamiento, es decir, del margen de temperaturas y velocidades, así como de la influencia del entorno.

Las temperaturas de funcionamiento más favorables se obtienen cuando el rodamiento contiene la cantidad mínima de lubricante necesario para proporcionar una lubricación fiable. Sin embargo, cuando el lubricante tiene funciones adicionales que realizar, como obturar o extraer el calor del rodamiento, entonces se necesitan mayores cantidades.

### **7.2 Lubricación con grasa**

Bajo condiciones normales de funcionamiento, es posible utilizar grasa para lubricar los rodamientos en la mayoría de sus aplicaciones.

La ventaja de la grasa con respecto al aceite, es que es más fácil de retener en la disposición de rodamientos, particularmente con ejes inclinados o verticales. También ayuda a obturar la disposición contra los contaminantes.

Una cantidad excesiva de grasa provoca un rápido aumento de la temperatura en el interior del rodamiento, particularmente cuando éste funciona a altas velocidades. Por regla general, solamente el rodamiento debe quedar completamente lleno de grasa en el momento de la puesta en marcha, mientras que el espacio libre que queda en el alojamiento debe estar parcialmente cubierto. Antes de que el rodamiento funcione a altas velocidades, se debe permitir que el exceso de grasa en el rodamiento se asiente o se elimine durante un período de rodaje. Al final del período de rodaje la temperatura de funcionamiento descenderá considerablemente, lo que indica que la grasa se ha distribuido adecuadamente en la disposición.

No obstante, cuando los rodamientos van a funcionar a velocidades muy bajas y se requiere una buena protección contra la contaminación y corrosión, es aconsejable llenar el alojamiento completamente de grasa.

### **7.3 Grasas lubricantes**

Las grasas lubricantes consisten en un aceite mineral o sintético combinado con un espesante. Estos espesantes suelen ser jabones metálicos. Sin embargo, también se pueden usar otros espesantes (como la poliurea) para conseguir un rendimiento superior en determinadas áreas, es decir, en aplicaciones con altas temperaturas.

Las grasas también pueden incluir aditivos que mejoran algunas de sus propiedades. La consistencia de una grasa depende principalmente del tipo y

de la concentración del espesante utilizado, así como de la temperatura de funcionamiento de la aplicación. Al elegir una grasa, los factores más importantes a tener en cuenta son la consistencia, el margen de temperaturas de funcionamiento, la viscosidad del aceite base, las propiedades antioxidantes y la capacidad de carga.

### **7.3.1 Viscosidad del aceite base**

La importancia de la viscosidad del aceite base en las grasas normalmente usadas para los rodamientos varía entre 15 y 500mm<sup>2</sup>/s a 40°C. Las grasas basadas en aceite con viscosidades superiores a 1000mm<sup>2</sup>/s a 40°C separan el aceite con tanta lentitud que no permiten la adecuada lubricación del rodamiento. Por tanto, en caso de que fuese necesaria una viscosidad superior a 1000mm<sup>2</sup>/s a 40°C por causa de las bajas velocidades, sería mejor usar una grasa con una viscosidad máxima de 1000mm<sup>2</sup>/s y buenas propiedades de separación de aceite o aplicar una lubricación con aceite.

### **7.3.2 Consistencia**

Las grasas se dividen en diferentes clases de consistencia de acuerdo a la escala del National Lubricating Grease Institute (NLGI). La consistencia de la grasa usada para la lubricación de un rodamiento no deberá experimentar cambios drásticos al funcionar dentro del margen de temperaturas especificado después de su trabajo mecánico.

Las grasas que se reblandecen a elevadas temperaturas pueden escapar de la disposición de los rodamientos. Las grasas que se endurecen a bajas temperaturas pueden restringir la rotación del rodamiento u ofrecer una separación de aceite insuficiente.

Las grasas utilizadas en los rodamientos son grasas espesadas con jabones metálicos de consistencia 1, 2 ó 3. Las grasas de consistencia 2 son las más comunes. Para las aplicaciones de baja temperatura o para un mejor bombeo se prefieren grasas con una menor consistencia.

Las grasas de consistencia 3 son las recomendadas para las disposiciones de rodamientos en ejes verticales, en las cuales se debe colocar un deflector debajo del rodamiento para evitar que éste se quede sin grasa.

En aplicaciones sometidas a vibraciones, la grasa está muy trabajada ya que es devuelta continuamente al rodamiento a causa de la vibración. Las grasas espesadas con poliurea se pueden ablandar o endurecer dependiendo del grado de cizallamiento de la aplicación. En las aplicaciones con ejes verticales se corre el riesgo de que la grasa de poliurea se escape bajo determinadas condiciones.

### **7.3.3 Margen de temperaturas – el concepto del semáforo**

El margen de temperaturas al que puede usarse una grasa depende principalmente del tipo de aceite base y del tipo de espesante empleados, así como de los aditivos.

En la figura 43 se ilustra de un modo esquemático las temperaturas correspondientes, en forma de un “doble semáforo”.

Las temperaturas límites extremas, es decir, el límite inferior y superior de temperatura, están bien definidas:

- El límite inferior de temperatura (LTL), es decir, la temperatura mínima a la cual la grasa permite que el rodamiento se ponga marcha sin dificultad, está en gran parte determinado por el tipo de aceite base y su viscosidad.
- El límite superior de temperatura (HTL), está determinado por el tipo de espesante y para las grasas con una base de jabón, está determinado por el punto de goteo. El punto de goteo indica la temperatura a la cual la grasa pierde su consistencia y se fluidifica.

Es evidente que no se recomienda el funcionamiento por debajo del límite inferior de temperatura ni por el límite superior de temperatura, tal como se muestra en la figura 43 mediante las zonas más oscuras. Aunque los fabricantes de grasas indican los valores específicos para los límites de temperatura inferior y superior en su información sobre el producto, las temperaturas verdaderamente importantes para un funcionamiento fiable vienen dadas por los valores de los siguientes límites:

- El límite inferior de temperatura para un rendimiento eficaz (LTPL)
- El límite superior de temperatura para un rendimiento eficaz (HTPL).

Es dentro de estos dos límites (la zona gris del centro), donde la grasa tendrá un funcionamiento fiable y se podrá determinar su vida de un modo preciso. Debido a que la definición de límite superior de temperatura para un rendimiento eficaz no está normalizada internacionalmente, se debe tener cuidado a la hora de interpretar los datos del proveedor.

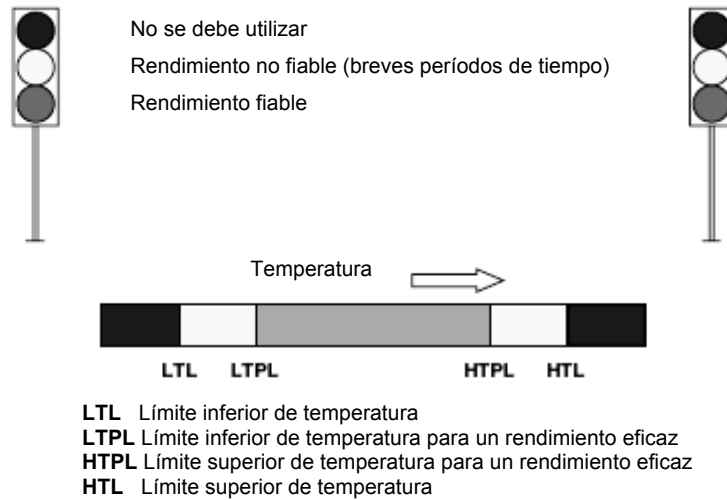
A temperaturas superiores al límite superior de temperatura para un rendimiento eficaz (HTPL), la grasa envejecerá y se oxidará con mayor rapidez y los derivados de la oxidación perjudicarán la lubricación. Por tanto, las

temperaturas de la zona más clara, entre el límite superior de la temperatura para un rendimiento eficaz y el límite superior de temperatura (HTL) sólo deben tener lugar durante breves períodos de tiempo.

También existe una zona más clara para las bajas temperaturas. Al descender la temperatura se reduce la tendencia a la separación de aceite y el espesor (consistencia) de la grasa aumenta. Esto provocará un suministro insuficiente de lubricante a las superficies de contacto de los elementos rodantes y los caminos de rodadura.

En la figura 43 está temperatura límite se encuentra indicada por el límite inferior de temperatura para un rendimiento eficaz (LTPL). Los valores para el límite inferior de temperatura para un rendimiento eficaz son diferentes para los rodamientos de rodillos y los de bolas. Debido a que los rodamientos de bolas son más fáciles de lubricar que los de rodillo, el límite inferior de temperatura para un rendimiento eficaz es menos importante para los rodamientos de bolas. No obstante, se pueden producir graves daños en los rodamientos de rodillos cuando funcionan de un modo continuado por debajo de este límite. Los cortos períodos de tiempo en esta zona, por ejemplo durante el arranque en frío, no son perjudiciales ya que el calor originado por la fricción hará que la temperatura del rodamiento esté en la zona gris.

**Figura 43. El concepto del semáforo para las grasas lubricantes**



Fuente: General Catalogue SKF

#### **7.3.4 Protección contra la corrosión, comportamiento en presencia de agua**

La grasa debe proteger al rodamiento contra la corrosión y no debe ser lavada de la disposición de rodamientos en el caso de penetración de agua. El tipo de espesante únicamente determina la resistencia al agua: las grasas de complejo de litio, de complejo de calcio y poliurea suelen ofrecer muy buena resistencia. El tipo de antioxidante determina principalmente las propiedades inhibitoras del óxido de las grasas.

A velocidades muy bajas, un llenado completo de grasas aumenta la protección contra la corrosión y previene la entrada de agua.

### **7.3.5 Capacidad de carga, aditivos EP y AW**

Si el espesor de la película de lubricante no es suficiente para evitar el contacto metálico entre las rugosidades de las superficies de contacto, la vida útil del rodamiento se reduce. Una opción para evitar este hecho es usar los aditivos denominados EP (extrema presión). Las altas temperaturas indicadas por el contacto entre las rugosidades superficiales, activan estos aditivos, produciendo un desgaste suave en los puntos de contacto. El resultado es una superficie más lisa, unas menores tensiones de contacto y una mayor vida útil.

Muchos de los aditivos EP modernos son de tipo azufre/fósforo. Por desgracia, estos aditivos pueden perjudicar la resistencia de la matriz de acero del rodamiento. Si se utilizan dichos aditivos, la actividad química no puede estar restringida a los contactos de las rugosidades superficiales.

Si la temperatura de funcionamiento y las tensiones de contacto son demasiado altas, los aditivos pueden reaccionar químicamente incluso sin que haya contacto entre las rugosidades superficiales. Esto puede activar los mecanismos de corrosión/difusión en las superficies de contacto, lo que puede acelerar el fallo del rodamiento, normalmente iniciado por una micro picadura. Por lo tanto, se recomienda el uso de aditivos EP menos reactivos para las temperaturas de funcionamiento superiores a 80°C.

Los lubricantes con aditivos EP no deben ser utilizados para rodamientos con temperaturas de funcionamiento superiores a 100°C. Para velocidades muy bajas, en ocasiones se incluyen aditivos en lubricantes sólidos, como el grafito y el bisulfuro de molibdeno ( $MoS_2$ ), con el fin de potenciar el efecto de los aditivos EP. Estos aditivos deben tener un alto nivel de pureza y unas partículas muy



pequeñas; de lo contrario las indentaciones producidas por el excesivo giro de las partículas pueden reducir la vida a fatiga del rodamiento.

Los aditivos AW (anti-desgaste) tienen una función similar a la de los aditivos EP, es decir, evitar un fuerte contacto entre metales. Por tanto, muchas veces los aditivos EP y AW no se diferencian entre sí. Sin embargo, funcionan de forma diferente. La principal diferencia es que el aditivo AW crea una capa protectora que se adhiere a la superficie. De este modo se pasa por encima de las rugosidades superficiales sin con tacto metálico. Por tanto, el desgaste suave no reduce la rugosidad, como ocurre en el caso de los aditivos EP. También deben tomarse precauciones especiales; es posible que los aditivos AW contengan elementos que puedan pasar al acero del rodamiento y debilitar su estructura, al igual que ocurre con los aditivos EP.

Ciertos espesantes (por ejemplo, el complejo de sulfonato de calcio) también ofrecen un efecto similar al de los aditivos EP/AW sin actividad química y sin afectar la vida a fatiga del rodamiento. Por tanto, los límites de temperatura de funcionamiento para los aditivos EP no son válidos para estas grasas.

### **7.3.6 Miscibilidad**

Si es necesario cambiar de una grasa a otra, es necesario tener en cuenta la miscibilidad o capacidad para mezclar las grasas sin efectos negativos.

Cuando se mezclan grasas incompatibles, la consistencia puede cambiar drásticamente y se pueden producir daños en el rodamiento debidos, por ejemplo, a fugas graves.

Las grasas que tienen el mismo espesante y aceites bases similares, generalmente se pueden mezclar sin ninguna consecuencia perjudicial, por ejemplo una grasa con espesante lítico y aceite mineral se pueden mezclar por lo general con otra grasa con espesante lítico y aceite mineral.

Asimismo, algunas grasas con diferentes espesantes se pueden mezclar entre sí, como las grasas de complejo de calcio y complejo de litio.

Para aquellas disposiciones de rodamientos en las que una baja consistencia puede dar lugar a que la grasa se escape de la disposición, en la siguiente relubricación se deberá cambiar toda la grasa de la disposición y de los conductos de lubricación, en lugar de reponer la que falte.

#### **7.4 Relubricación**

Los rodamientos necesitan relubricación cuando la duración de la grasa usada es inferior a la duración prevista del rodamiento. La relubricación debe tener lugar cuando las condiciones de su lubricante aún son satisfactorias.

El intervalo de lubricación adecuado, depende de muchos factores. Estos factores incluyen el tipo y tamaño del rodamiento, la velocidad, la temperatura de funcionamiento, el tipo de grasa, el espacio que rodea al rodamiento y su entorno.

Sólo es posible basar las recomendaciones en reglas estadísticas. Se definen los intervalos de relubricación como el período de tiempo al final del cual un 99% de los rodamientos siguen lubricados de manera fiable. Esto representa la vida de las grasas.

### 7.4.1 Intervalos de relubricación

En la figura 44 se pueden hallar los intervalos de relubricación  $t_f$  para los rodamientos con aro interior rotativo, en ejes horizontales y bajo condiciones de funcionamiento y de limpieza normales, donde se relaciona la cantidad de horas de funcionamiento y la relación de carga del rodamiento, esto como una función de:

- El factor de velocidad "A" multiplicado por el factor para el rodamiento correspondiente  $b_f$

donde

$$A = nd_m$$

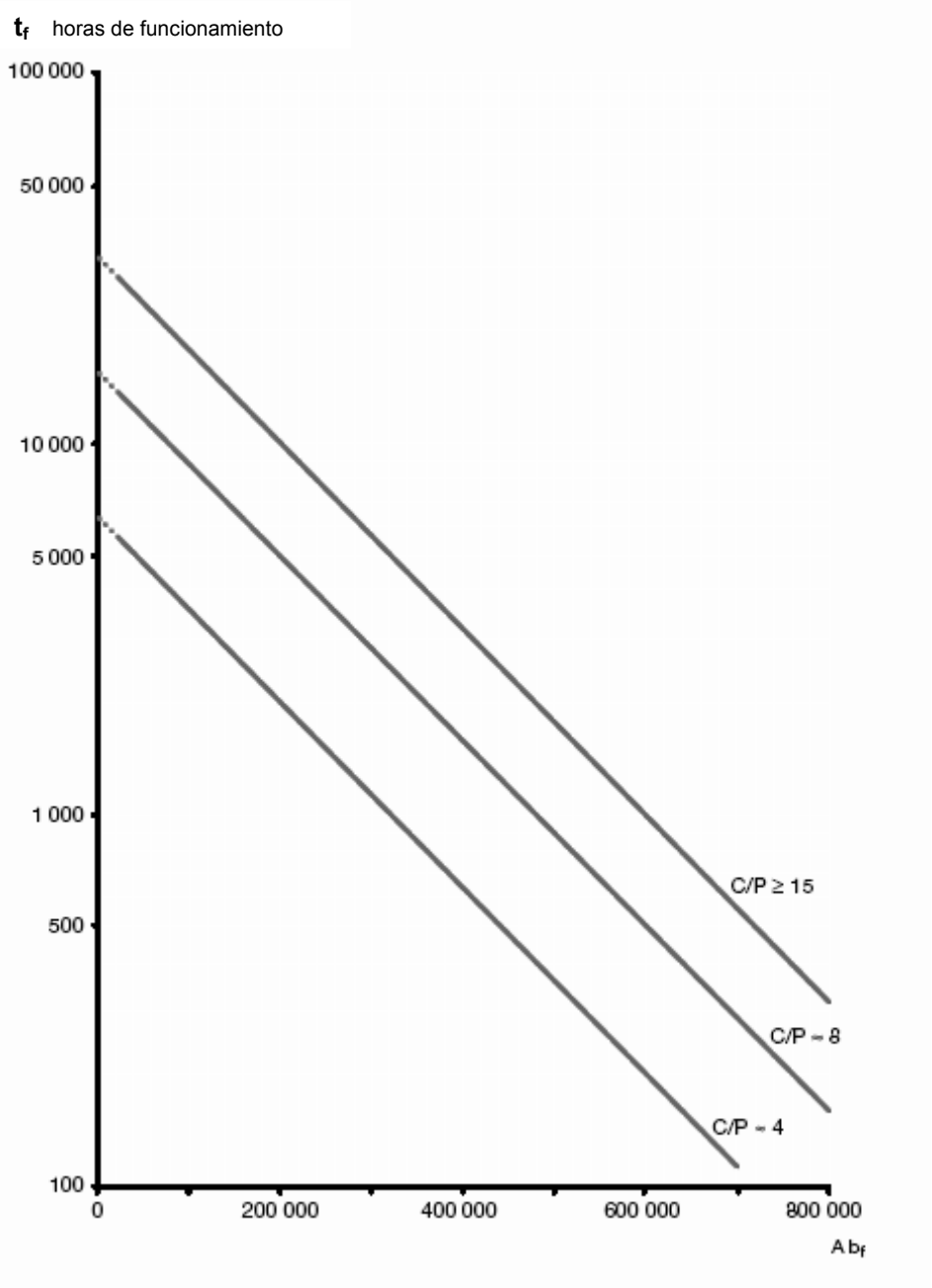
$n$  = velocidad de giro en, rpm

$d_m$  = diámetro medio del rodamiento =  $0.5(d+D)$ , mm

$b_f$  = factor para el rodamiento que depende del tipo de rodamiento y de las condiciones de carga.

- La relación de carga C/P.

**Figura 44. Intervalos de relubricación a temperaturas de funcionamiento de 70°C**



Fuente: General Catalogue SKF

El intervalo de relubricación  $t_f$  es un valor estimado, válido para una temperatura de funcionamiento de 70°C, usando grasas con espesante lítico y aceite mineral de buena calidad.

## **7.4.2 Ajustes de los intervalos de relubricación debido a las condiciones de funcionamiento y tipos de rodamientos**

### **7.4.2.1 Temperatura de funcionamiento**

Para tener en cuenta la aceleración del envejecimiento de la grasa con el aumento de la temperatura, se recomienda reducir a la mitad los intervalos indicados en la figura 44 por cada 15°C de incremento de la temperatura de funcionamiento por encima de los 70°C, recordando que no se debe superar el límite superior de la temperatura para un rendimiento eficaz de la grasa (ver HTPL en figura 43).

Se puede prolongar el intervalo de relubricación a temperaturas inferiores a 70°C si la temperatura no está cerca del límite inferior de temperatura para un rendimiento eficaz (ver LTPL en figura 43). En ningún caso se recomienda ampliar el intervalo de lubricación por más del doble. En caso de los rodamientos completamente llenos de elementos rodantes y los rodamientos axiales de rodillos, los valores para  $t_f$  obtenidos de la figura 44 no deben ser ampliados.

Asimismo, no se recomienda el uso de intervalos de relubricación que rebasen las 30,000 horas.

Para muchas aplicaciones existe un límite práctico para la lubricación con grasa, cuando el aro de rodamiento con la temperatura más elevada alcanza

una temperatura de funcionamiento de 100°C. Por encima de esta temperatura se deben usar grasas especiales. Asimismo deben tenerse en cuenta la estabilidad térmica del rodamiento y el fallo prematuro de la obturación.

#### **7.4.2.1 Vibración**

Una vibración moderada no perjudicará la duración de la grasa, pero unos niveles altos de vibración y de choque, como los que se producen en cribas vibratorias, harán que la grasa se agite. En estos casos se debe reducir el intervalo de relubricación. Si la grasa se reblandece demasiado, se debe utilizar una grasa con una mejor estabilidad mecánica, por ejemplo una grasa con un mayor espesor hasta NLGI 3.

#### **7.4.2.2 Contaminación**

En el caso de la entrada de contaminación, se debe realizar la relubricación con mayor frecuencia, con el fin de reducir los efectos negativos de las partículas contaminantes sobre la grasa a la vez que se reducen los efectos perjudiciales causados por el giro excesivo de las partículas. Los fluidos contaminantes también requieren un intervalo de relubricación menor. Si la contaminación es alta, se debe considerar una relubricación continua.

#### **7.4.2.3 Desalineación**

Una desalineación constante dentro de los límites admisibles no perjudica la duración de la grasa en los rodamientos de rodillos a rótula o en los rodamientos de bolas a rótula.

### 7.4.3 Observaciones

Si el valor especificado para el intervalo de relubricación  $t_f$  es demasiado corto para una aplicación determinada, se recomienda lo siguiente:

- Comprobar la temperatura de funcionamiento del rodamiento.
- Comprobar si la grasa está contaminada por partículas sólidas o fluidos.
- Comprobar las condiciones de funcionamiento del rodamiento, como la carga o la desalineación
- Considerar el uso de una grasa más adecuada.

### 7.5 Procedimientos de relubricación

La elección del proceso de relubricación depende por lo general, del la aplicación del intervalo de relubricación  $t_f$  obtenido:

- Si el intervalo de relubricación es inferior a seis meses, el método más cómodo y preferible es la reposición. Este método permite un funcionamiento sin interrupciones y ofrece una temperatura constante más baja en comparación con la relubricación continua.
- Cuando los intervalos de relubricación son superiores a seis meses, generalmente se recomienda renovar el llenado de grasa. Este procedimiento suele aplicar como parte del programa de mantenimiento de los rodamientos, por ejemplo en aplicaciones ferroviarias.
- La relubricación continua se usa cuando los intervalos de relubricación son cortos, por ejemplo a causa de los efectos perjudiciales de la contaminación o cuando no resulta cómodo usar otros métodos de relubricación debido a la dificultad de acceso al rodamiento. No obstante, la relubricación continua no está recomendada para las aplicaciones con

altas velocidades de giro, ya que la continua agitación de la grasa puede causar unas temperaturas de funcionamiento muy elevadas y la destrucción de la estructura espesante de la grasa.

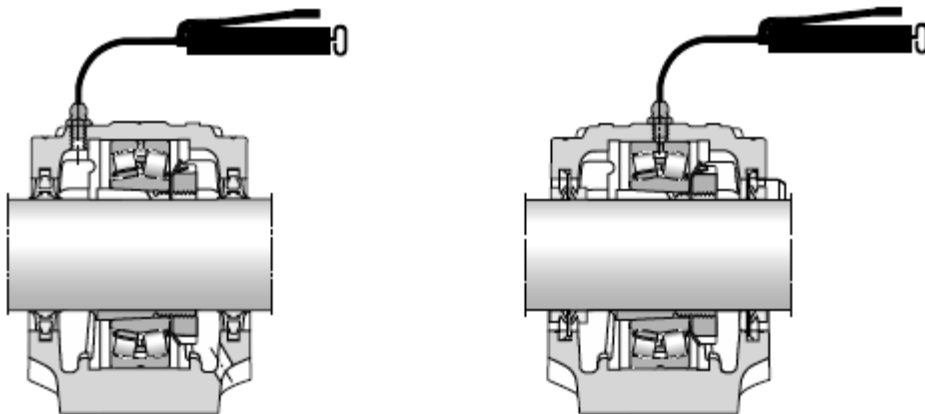
Cuando en una disposición de rodamientos se utilizan rodamientos diferentes, es bastante habitual aplicar el menor intervalo de relubricación estimado para ambos rodamientos.

### 7.5.1 Reposición

Inicialmente el rodamiento debe quedar completamente lleno de grasa, mientras que el espacio libre que queda en el alojamiento debe estar parcialmente lleno de grasa. Dependiendo del método de reposición que se pretenda utilizar, se recomiendan los siguientes porcentajes de llenado de grasa para el espacio libre en el alojamiento:

- 40% cuando la reposición se realiza desde el lateral del rodamiento
- 20% cuando la reposición se realiza a través de la ranura anular y los orificios de lubricación situados en el aro exterior o interior del rodamiento.

**Figura 45. Reposición de grasa por el lateral y por la ranura anular**



Fuente: General Catalogue SKF



Las cantidades adecuadas para la reposición desde el lateral de un rodamiento se pueden obtener con la fórmula siguiente:

$$G_p = 0.005DB$$

y para la reposición a través del aro exterior o interior del rodamiento, con la fórmula:

$$G_p = 0.002DB$$

donde:

$G_p$  = cantidad de grasa a añadir durante la reposición, g

$D$  = diámetro exterior del rodamiento, mm

$B$  = anchura total del rodamiento (para los rodamientos axiales se debe usar la altura  $H$ ), mm.

Para facilitar el suministro de grasa mediante el uso de una pistola engrasadora, se debe colocar una boquilla engrasadora en el soporte. Si se utilizan obturaciones rozantes, el soporte debe tener un orificio de escape con el fin de impedir la acumulación de grasa en el espacio alrededor del rodamiento ya que esto podría causar un aumento permanente de la temperatura del mismo. Cuando se utilice agua a alta presión para la limpieza, este orificio de escape se debe taponar.

### **7.5.2 Renovación del llenado de grasa**

Cuando se renueva el llenado de grasa en el intervalo de relubricación estimado o después de varias reposiciones, se deberá extraer y reemplazar toda la grasa usada en la disposición de rodamientos por grasa nueva.

El rodamiento y el alojamiento se deberán llenar de grasa según las indicaciones de la reposición. Para poder renovar el llenado de grasa, el soporte del rodamiento debe ser accesible fácilmente y poder abrirse. Para tener acceso al rodamiento, se puede retirar la tapa de los soportes de dos piezas y las tapas laterales de los soportes enterizos. Después de retirar la grasa usada, se debe introducir primero grasa nueva en los elementos rodantes.

Se debe tener mucho cuidado para evitar que entren contaminantes en el rodamiento o en el soporte durante la relubricación y también se debe proteger la propia grasa. Se recomienda utilizar guantes resistentes a la grasa para evitar reacciones alérgicas de la piel.

Cuando los soportes son menos accesibles pero disponen de boquillas engrasadoras y orificios de escape, el llenado de grasa se puede renovar totalmente relubricando varias veces, de manera sucesiva, hasta que se haya expulsado toda la grasa vieja del rodamiento. Este procedimiento requiere una cantidad de grasa mucho mayor que la necesaria para la renovación manual de la misma. Asimismo, este método de renovación está limitado por las velocidades de funcionamiento: a altas velocidades, aumentará indebidamente la temperatura a causa de la excesiva agitación de la grasa.

### **7.5.3 Relubricación continua**

Este procedimiento se usa cuando el intervalo de relubricación es corto, por ejemplo a causa de los efectos perjudiciales de la contaminación o cuando no resulta cómodo usar otros métodos de relubricación, por ejemplo cuando el acceso al rodamiento es difícil.

Debido a que la excesiva agitación de la grasa puede aumentar la temperatura, la lubricación continua sólo se recomienda cuando las velocidades de giro son bajas, es decir, con factores de velocidad de:

- $A < 150,000$  para los rodamientos de bolas
- $A < 75,000$  para los rodamientos de rodillos.

En estos casos, el llenado inicial de grasa del soporte puede ser del 100% y la cantidad para la relubricación por unidad de tiempo se calcula con las ecuaciones para  $G_p$  repartiendo la cantidad correspondiente a lo largo del intervalo de relubricación. Cuando se utiliza la relubricación continua, se debe comprobar se la grasa se puede bombear adecuadamente a través de los conductos a la temperatura ambiente.

## **7.6 Lubricación con aceite**

Normalmente la lubricación con aceite se emplea cuando las elevadas velocidades o las altas temperaturas de funcionamiento no permiten el uso de grasa, cuando es necesario evacuar del rodamiento el calor producido por la fricción o cuando los componentes adyacentes están lubricados con aceite.

### **7.6.1 Métodos de lubricación con aceite**

#### **7.6.1.1 Baño de aceite**

El método de lubricación más sencillo es el baño de aceite. El aceite recogido por los componentes rotativos del rodamiento se distribuye por todo el interior del rodamiento y después vuelve a caer al baño de aceite. Cuando el

rodamiento no gira, el aceite deberá tener un nivel ligeramente inferior al centro del elemento que ocupe la posición más baja.

Para conseguir el nivel de aceite adecuado se recomienda utilizar niveladores de aceite. Cuando se opera a altas velocidades, el nivel de aceite puede descender significativamente y el nivelador de aceite puede llenar excesivamente el alojamiento.

#### **7.6.1.2 Anillo de lubricación**

Para los rodamientos en los que, debido a la velocidad, las condiciones de funcionamiento y la necesidad de una alta fiabilidad, se requiere una lubricación por aceite, se recomienda el uso de un anillo lubricador.

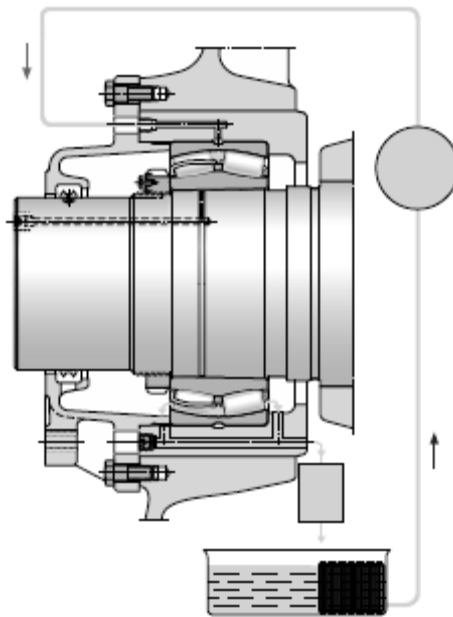
Este sirve para provocar la circulación del aceite. El anillo cuelga libremente en un casquillo situado en el eje a un lado del rodamiento, y se sumerge en el aceite situado en un depósito en la base del soporte. El anillo gira con el eje y transporta el aceite desde la base del soporte hasta un canalón de recogida. A continuación el aceite fluye por el rodamiento y vuelve al depósito en la base del soporte.

#### **7.6.1.3 Circulación de aceite**

Un funcionamiento a altas velocidades aumenta la temperatura de funcionamiento del rodamiento y acelera el envejecimiento del aceite. Para evitar los frecuentes cambios de aceite y para conseguir una lubricación adecuada, normalmente se prefiere la circulación de aceite.

La circulación de aceite se consigue normalmente con la ayuda de una bomba. Después de pasar por el rodamiento, el aceite generalmente se asienta en un depósito en el que se filtra y en caso necesario se enfría antes de volver al rodamiento.

**Figura 46. Lubricación por circulación de aceite**



Fuente: General Catalogue SKF

#### **7.6.1.4 Chorro de aceite**

Para un funcionamiento a velocidades muy altas, se debe suministrar al rodamiento un cantidad suficiente de aceite, pero no excesiva; con el fin de obtener una lubricación adecuada sin que la temperatura de funcionamiento aumente más de lo necesario.

Un método particularmente eficaz para conseguir esto es con el método de chorro de aceite, en el que se inyecta un chorro de aceite a presión por un lateral del rodamiento. La velocidad del chorro de aceite debe ser lo suficientemente elevada (por lo menos 15m/s) como para penetrar la turbulencia alrededor del rodamiento.

#### **7.6.1.5 Niebla de aceite**

Durante algún tiempo no se ha recomendado el uso de la lubricación con niebla de aceite debido a sus posibles efectos negativos para con el medio ambiente.

Los nuevos generadores de niebla de aceite permiten producir una niebla de aceite con 5 ppm de aceite. Asimismo, los nuevos diseños de obturaciones especiales limitan al mínimo la dispersión de niebla. Los efectos medioambientales se reducen aún más en caso de utilizar aceite sintético no tóxico. Hoy en día la lubricación con niebla de aceite se utiliza en aplicaciones muy específicas, tal es el caso de la industria petrolera.

#### **7.6.2 Aceites lubricantes**

Los aceites minerales puros son los que normalmente se prefieren para la lubricación de los rodamientos. Normalmente, los aceites EP, AW y de otro tipo para mejorar determinadas propiedades de lubricación sólo se emplean en casos especiales.

Existen versiones sintéticas de muchos de los lubricantes más frecuentes. Por lo general sólo se considera el uso de aceites sintéticos para la

lubricación de rodamientos en casos extremos, por ejemplo, a temperaturas de funcionamiento muy bajas o muy altas. El término “aceite sintético” abarca una amplia gama de materiales básicos. Los principales son las polialfaolefinas (PAO), los aceites de éster y los polialquilenglicoles (PAG).

El espesor real de la película de lubricante juega un papel fundamental en cuanto a la vida a fatiga del rodamiento. Para una lubricación adecuada, la viscosidad del aceite, el índice de viscosidad y el coeficiente de presión-viscosidad influyen sobre el espesor real de la película en la zona de contacto.

Los aditivos también influyen sobre la formación de la película. Debido a las diferencias en la solubilidad, para los aceites sintéticos, se aplican diferentes tipos de aditivos en comparación con sus equivalentes basado en aceites minerales.

### **7.6.3 Selección del aceite lubricante**

La selección del aceite esta basada fundamentalmente en la viscosidad requerida para proporcionar una lubricación adecuada del rodamiento a la temperatura de funcionamiento. La viscosidad del aceite depende de la temperatura y disminuye con el aumento de la misma. La relación entre la temperatura y la viscosidad de un aceite se muestra en el índice de viscosidad IV. Los aceites recomendados para la lubricación de los rodamientos son los que tienen un alto índice de viscosidad, de 95 como mínimo.

Para que se forme una película suficientemente espesa entre la zona de contacto de los elementos rodantes y los caminos de rodadura, el aceite debe conservar una viscosidad mínima a la temperatura de funcionamiento.

#### **7.6.4 Cambio de aceite**

La frecuencia con la que se debe cambiar el aceite depende principalmente de las condiciones de funcionamiento y de la calidad del aceite.

Cuando se emplea una lubricación por baño de aceite, generalmente es suficiente cambiar el aceite una vez al año, con tal de que la temperatura de funcionamiento no supere los 50°C y de que haya poco riesgo de contaminación. Para temperaturas más elevadas es preciso efectuar los cambios con más frecuencia, por ejemplo, para temperaturas de funcionamiento próximas a 100°C deberá cambiarse el aceite cada tres meses.

Para condiciones de funcionamiento extremas también es preciso cambiar el aceite con mayor frecuencia.

Para la lubricación por circulación de aceite, el intervalo entre dos cambios de aceite también depende de la frecuencia de la circulación, de la tonalidad del aceite y de si éste se refrigera o no. Normalmente el intervalo más adecuado sólo puede determinarse mediante pruebas y examinando frecuentemente el estado del aceite para comprobar que no está contaminado ni excesivamente oxidado. Esto también es válido para la lubricación a chorro de aceite.



## **8. MONTAJE Y DESMONTAJE DE LOS RODAMIENTOS**

### **8.1 Información general**

Es esencial que el montaje de los rodamientos de bolas y de rodillos se lleve a cabo por personal calificado y en condiciones de rigurosa limpieza, para conseguir así un buen funcionamiento y evitar un fallo prematuro.

Como todos los componentes de precisión, la manipulación de los rodamientos durante su montaje se debe realizar con sumo cuidado. Es muy importante elegir el método de montaje y las herramientas apropiadas

Para conseguir la máxima vida útil del rodamiento, éste debe estar correctamente montado, lo que a menudo es más difícil de lo que parece, especialmente en el caso de los rodamientos de gran tamaño.

#### **8.1.1 Donde realizar el montaje**

Los rodamientos se deben montar en un entorno seco y sin polvo, lejos de trabajos de mecanización o de máquinas que produzcan virutas o polvo.

Cuando los rodamientos se han de montar en un entorno desprotegido, lo que suele suceder en el caso de los rodamientos de gran tamaño, se deben tomar algunas medidas para proteger el rodamiento y el entorno en el que se realiza el montaje de la contaminación causada por el polvo, la suciedad y la humedad hasta que el montaje haya finalizado. Esto se puede realizar tapando los rodamientos y los componentes de la máquina con papel de cera o papel metalizado.

### **8.1.2 Preparación para el montaje y desmontaje**

Antes de montar los rodamientos y todos sus componentes, se debe tener a mano todas las herramientas, los equipos y la información necesaria. Se recomienda asimismo que se estudien todos los planos y las instrucciones para determinar el orden correcto del montaje de todos los componentes.

Se deberá comprobar que todos los soportes, ejes, obturaciones y otros componentes de la disposición estén limpios, especialmente los orificios roscados, conductos o ranuras en las que se pueden acumular restos de mecanizaciones anteriores. Las superficies no mecanizadas de los soportes de fundición deberán estar limpias de arena de moldeo y se deberán eliminar todas las rebabas.

También se deberá verificar la precisión dimensional y exactitud de forma de todos los componentes de la disposición del rodamiento. Los rodamientos sólo tendrán un rendimiento satisfactorio si sus componentes tienen la precisión requerida y si se siguen las tolerancias señaladas.

### **8.1.3 Manipulación de los rodamientos**

Generalmente es una buena medida utilizar guantes y herramientas de transporte y elevación diseñadas especialmente para el montaje y desmontaje de rodamientos. De este modo se ahorra no sólo tiempo y dinero, sino que el trabajo será menos agotador, menos peligroso y menos perjudicial para la salud.

Por estos motivos cuando se manipulen rodamientos calientes o llenos de aceite, se recomienda el uso de guantes resistentes al calor y aceite. Estos

guantes deben tener una superficie exterior duradera y un interior suave y antialérgico.

Los rodamientos y/o grandes o pesados, suelen causar problemas debido a que no se pueden manipular de un modo seguro y eficaz por una o dos persona.

Si se van a mover o posicionar rodamientos grandes y pesados mediante la elevación de los mismos, éstos no deben colgar de un solo punto, sino que se debe usar una banda de acero o una correa de tela. La colocación de un muelle entre el gancho del aparato elevador de la correa, facilita el posicionamiento del rodamiento sobre su eje.

**Figura 47. Forma correcto de elevar rodamientos grandes y/o pesados**



Fuente: General Catalogue SKF

## **8.2 Montaje**

El método (mecánico, térmico o hidráulico) usado para montar un rodamiento depende del tipo y del tamaño del mismo. En cualquier caso, es importante que los aros, jaulas, elementos rodantes y obturaciones del rodamiento no reciban golpes directos, y que la fuerza de montaje nunca se dirija directamente a través de los elementos rodantes.

Algunos componentes se pueden montar con un ajuste flojo. Para evitar la corrosión de contacto entre las superficies de contacto, se recomienda aplicar una fina capa de agente anticorrosión.

### **8.2.1 Montaje de rodamientos con agujero cilíndrico**

En el caso de los rodamientos no desarmables, generalmente se recomienda montar primero el aro que tiene el ajuste más fuerte. Antes del montaje se deberá lubricar ligeramente con aceite fino la superficie de los asientos.

#### **8.2.1.1 Montaje en frío**

Si el ajuste no es demasiado fuerte, los rodamientos pequeños se pueden posicionar aplicando ligeros golpes de martillo sobre un manguito colocado contra la cara del aro de rodamiento. Los golpes se deben distribuir uniformemente por todo el aro para evitar que el rodamiento se incline o se tuerza.

Para calar un rodamiento no desarmable sobre el eje y en el alojamiento de manera simultánea, la fuerza de montaje se debe aplicar de un modo

uniforme a ambos aros y las superficies de apoyo de las herramientas de montaje deben estar en el mismo plano. En este caso se debe utilizar una herramienta de ajuste de rodamientos, donde el aro de impacto hace tope con las caras laterales de los aros interior y exterior, y el manguito permite aplicar las fuerzas de un modo centrado.

En el caso de los rodamientos desarmables, el aro interior se puede montar independientemente del aro exterior, lo cual simplifica el montaje, especialmente cuando ambos aros han de tener ajustes de interferencia.

#### **8.2.1.2 Montaje en caliente**

Los rodamientos más grandes generalmente no se pueden montar en frío, ya que la fuerza que se requiere para montar un rodamiento aumenta considerablemente con el tamaño del mismo. Por ese motivo, los rodamientos, los aros interiores o los soportes se calientan antes de su montaje.

La diferencia de temperatura requerida entre el aro del rodamiento y el eje o el soporte depende del grado de interferencia y el diámetro del asiento del rodamiento. Los rodamientos no deben calentarse a más de 125°C, ya que podrían producirse cambios dimensionales originados por alteraciones en la estructura de su material.

Los rodamientos equipados con placas de protección u obturaciones no se deben calentar a más de 80°C, debido a la grasa que contienen o al material de la obturación.

### **8.2.2 Ajuste de los rodamientos**

Contrariamente a otros rodamientos radiales con agujero cilíndrico, el juego interno de los rodamientos de una hilera de de bolas con contacto angular y de los rodamientos de rodillos cónicos no queda determinado hasta que el rodamiento haya sido ajustado contra un segundo rodamiento. Normalmente, estos rodamientos se montan apareados, ya sea espalda con espalda o cara con cara, y un aro del rodamiento se desplaza axialmente hasta conseguir el juego o la precarga requerida.

La elección del juego o la precarga depende de las exigencias en cuanto al rendimiento de la disposición de rodamientos y de las condiciones de funcionamiento.

El valor adecuado para el juego durante el montaje, viene determinado por las condiciones del rodamiento bajo carga y la temperatura de funcionamiento. Dependiendo del tamaño y de la disposición de rodamientos, los materiales del eje y del soporte, y la distancia entre los dos rodamientos; le juego inicial obtenido durante el montaje podrá ser mayor o menor durante el funcionamiento real. Si, por ejemplo, una dilatación térmica diferencial de los aros interior y exterior reduce el juego del funcionamiento, el juego inicial deberá ser lo suficientemente grande como para evitar la distorsión de los rodamientos y las consecuencias perjudiciales que esto pueda tener.

### **8.2.3 Montaje de rodamientos con agujero cónico**

Los aros interiores de los rodamientos con un agujero cónico siempre se montan con un ajuste de interferencia. El grado de interferencia no viene determinado por la tolerancia del eje seleccionada, como en el caso de los

rodamientos con un agujero cilíndrico, sino por la distancia de calado del rodamiento en el asiento cónico del eje o del manguito de fijación o desmontaje. Al calar el rodamiento en el asiento cónico, su juego radial interno se reduce. Esta reducción se puede medir para determinar el grado de interferencia y el ajuste adecuado.

Cuando se montan rodamientos de bolas a rótula, rodamientos de rodillos a rótula, así como rodamientos de rodillos cilíndricos de alta precisión con agujero cónico, se determina y se usa como grado de interferencia, la reducción del juego radial interno o el calado axial en el asiento cónico.

#### **8.2.3.1 Rodamientos pequeños**

Los rodamientos pequeños se pueden calar en un asiento cónico usando una tuerca. En el caso de los manguitos de fijación, se utiliza la tuerca del manguito. Se pueden calar manguitos de desmontaje pequeños en el agujero del rodamiento usando una tuerca. Para apretar la tuerca se puede usar una llave de gancho o de impacto. Antes de comenzar el montaje, las superficies del asiento del eje y del manguito se deberán lubricar ligeramente con aceite fino.

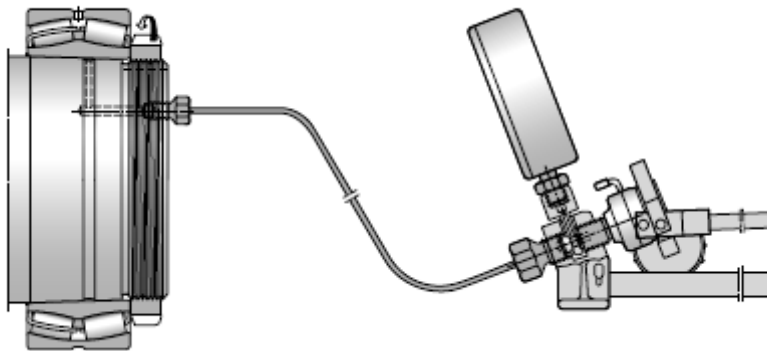
#### **8.2.3.2 Rodamientos medianos y grandes**

Para los rodamientos más grandes, es necesaria una fuerza considerablemente mayor y se deberán utilizar las tuercas hidráulicas o se deberá emplear el método de inyección de aceite.

En cualquier caso, el proceso de montaje será considerablemente más fácil. Cuando se utilice una tuerca hidráulica para montar el rodamiento, ésta deberá ser colocada en una sección roscada del eje o en la rosca del manguito,

de modo que su pistón anular haga tope con el aro interior del rodamiento, una tuerca sobre el eje o un disco fijado al extremo del eje. Al bombear el aceite en la tuerca hidráulica se desplaza el pistón axialmente con la fuerza necesaria para que el montaje sea preciso y rápido.

**Figura 48. Montaje de un rodamiento con agujero cónico utilizando una tuerca hidráulica e inyección de aceite**



Fuente: General Catalogue SKF

### **8.2.3.3 Determinación del ajuste de interferencia**

Los rodamientos con agujero cónico siempre se montan con ajuste de interferencia. Para determinar y medir el grado de interferencia se utiliza la reducción del juego radial interno o el desplazamiento axial del interior en su asiento cónico.

Para medir el grado de interferencia se pueden utilizar distintos métodos:

- Medición de la reducción del juego contra una galga.
- Medición del ángulo de apriete de la tuerca de fijación.
- Medición del calado axial.
- Medición de la expansión del aro interior.



#### **8.2.4 Prueba de funcionamiento**

Después de montar un rodamiento, se aplica el lubricante adecuado y se efectúa una prueba de funcionamiento para poder comprobar el ruido y la temperatura del rodamiento.

La prueba de funcionamiento se debe realizar bajo carga parcial, a una velocidad lenta o moderada. En ningún caso se permitirá que los rodamientos arranquen sin carga y aceleren hasta alcanzar altas velocidades, ya que se corre el riesgo de que los elementos rodantes se deslicen sobre los caminos de rodadura y los dañen o que la jaula quede sometida a esfuerzos inadmisibles.

El ruido y las vibraciones se pueden comprobar usando un estetoscopio electrónico. Normalmente, los rodamientos producen un ruido de “ronroneo” uniforme. Los sonidos silbantes o chirridos indican que la lubricación es inadecuada.

Un aumento de temperatura se produce en el rodamiento inmediatamente después de su puesta en marcha, esto es normal. Por ejemplo, en el caso de la lubricación con grasa, la temperatura no bajará hasta que la grasa se haya distribuido uniformemente en la disposición de rodamientos, después de lo cual la temperatura se equilibrará.

Las obturaciones deben ser comprobadas durante la prueba de funcionamiento o inmediatamente después de la misma para ver si realizan su función correctamente. Se debe comprobar también el equipo de lubricación que se utilice o el nivel de aceite del baño de aceite. Puede que sea necesario extraer muestras del lubricante para determinar si hay contaminación en la disposición de rodamientos o si los componentes de la misma están gastados.

## **8.3 Desmontaje**

Si los rodamientos se van a volver a utilizar después de haber sido desmontados, la fuerza necesaria para desmontarlos no se debe aplicar nunca en los elementos rodantes.

En el caso de los rodamientos desarmables, el aro con los elementos rodantes y la jaula se pueden desmontar independientemente del otro aro. Con los rodamientos no desarmables, en primer lugar se deberá retirar de su asiento el aro que tiene el ajuste más flojo.

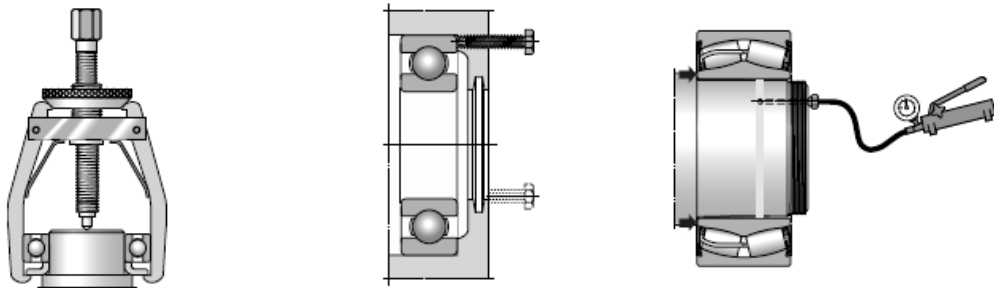
### **8.3.1 Desmontaje de rodamientos con un agujero cilíndrico**

#### **8.3.1.1 Desmontaje en frío**

Los rodamientos pequeños se pueden desmontar de su asiento aplicando ligeros golpes de martillo, con un botador adecuado, en la cara del aro o preferiblemente usando un extractor. Las garras del extractor deberán situarse alrededor de la cara lateral del aro que se va a desmontar, o de un componente adyacente. El desmontaje se facilita si:

- existen ranuras en los resaltes del eje y/o soporte en las cuales colocar las garras del extractor o
- se disponen orificios roscados en los resaltes del soporte para tornillos de desmontaje.

**Figura 49. Desmontaje de rodamientos utilizando extractor, tornillos de desmontaje e inyección de aceite**



Fuente: General Catalogue SKF

El desmontaje de los rodamientos de mayor tamaño montados con un ajuste de interferencia suele requerir fuerza mayor, especialmente si se ha producido corrosión de contacto después de un largo período de funcionamiento. En estos casos el método de inyección de aceite facilita considerablemente de desmontaje. Esto supone incluir los conductos de suministro de aceite y las ranuras de distribución necesarios en el diseño de la disposición.

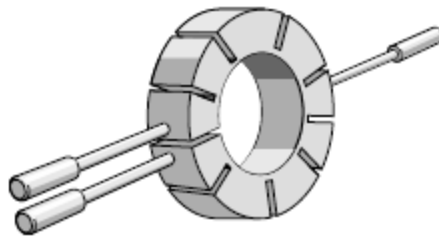
### **8.3.1.2 Desmontaje en caliente**

Para desmontar los aros interiores de los rodamientos de rodillos cilíndricos sin pestañas o con una sola pestaña, se han desarrollado calentadores de inducción especiales. Estos calientan rápidamente el aro interior sin calentar apenas el eje, de manera que el aro interior dilatado se pueda extraer fácilmente. Estos calentadores de inducción eléctrica cuentan con una o más bobinas alimentadas por corriente alterna. Después de calentar y extraer los aros interiores es necesario desmagnetizarlos.

Para el montaje y desmontaje frecuente de rodamientos del mismo tamaño, el uso de herramientas eléctricas de desmontaje resulta económico.

Para desmontar los aros interiores sin pestañas o con una sola pestaña de los rodamientos de rodillos cilíndricos que no se han desmontado con demasiada frecuencia, o para desmontar los aros interiores de mayor tamaño (hasta 400mm) es más económico y más sencillo usar lo que denominamos como un aro de desmontaje térmico; también conocido como aro de calentamiento. Se trata de un aro rasurado, generalmente de aleación ligera con mangos.

**Figura 50. Aro de desmontaje térmico o aro de calentamiento**



Fuente: General Catalogue SKF

### **8.3.2 Desmontaje de rodamientos con agujero cónico**

#### **8.3.2.1 Desmontaje de rodamientos sobre ejes cónicos**

El desmontaje de rodamientos pequeños y medianos montados sobre ejes cónicos puede realizarse utilizando extractores convencionales, que se enganchan en el aro interior del rodamiento.

Para evitar dañar el rodamiento, es preferible utilizar un extractor con autocentrado. Los rodamientos montados en asientos cónicos suelen aflojarse rápidamente. Por tanto, para evitar que el rodamiento salga totalmente del eje, se debe colocar alguna clase de tope, como por ejemplo, una tuerca de fijación.

El desmontaje de grandes rodamientos sobre ejes cónicos se facilita considerablemente empleando el método de inyección de aceite. Al introducir aceite a presión entre las superficies de contacto, el rodamiento saldrá bruscamente de su asiento. Por tanto, se debe colocar un tope, por ejemplo, una tuerca de eje o una placa de fijación, para limitar el movimiento axial del rodamiento a algo más que la distancia de calado.

### **8.3.2.2 Desmontaje de rodamientos sobre un manguito de fijación**

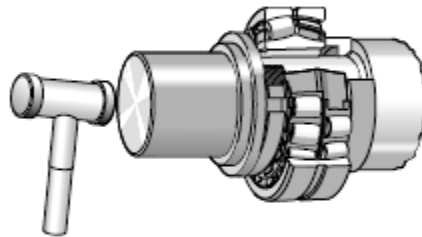
Los rodamientos pequeños y medianos montados sobre un manguito de fijación y en ejes lisos, se pueden desmontar golpeando un botador con un martillo hasta que el rodamiento quede libre. Antes la tuerca del manguito debe aflojarse varias vueltas.

Los rodamientos pequeños y medianos montados sobre un manguito de fijación y en ejes escalonados contra un anillo de apoyo, se pueden desmontar usando un tope con la tuerca del manguito previamente aflojada varias vueltas.

El desmontaje de rodamientos de gran tamaño sobre un manguito de fijación con una tuerca hidráulica es fácil de realizar. Sin embargo, para poder usar esta técnica el rodamiento debe estar montado sobre un anillo de apoyo. Si los manguitos cuentan con conductos de suministro de aceite y ranuras de

distribución, el desmontaje resulta más fácil, ya que se puede emplear el método de inyección de aceite.

**Figura 51. Desmontaje de rodamientos con agujero cónico utilizando un martillo**



Fuente: General Catalogue SKF

#### **8.4 Almacenamiento de los rodamientos**

Los rodamientos pueden permanecer almacenados en su envoltorio original durante varios años, siempre que la humedad relativa del almacén no supere el 60% y no haya grandes variaciones de temperatura. El almacén también debe estar libre de vibraciones y temblores.

En el caso de los rodamientos obturados o con placas de protección, puede que las propiedades de lubricación de la grasa con la que están llenos, se deterioren si los rodamientos han permanecido almacenados durante mucho tiempo. Los rodamientos que no están almacenados en sus envoltorios originales deben estar bien protegidos contra la corrosión y la contaminación.

Los rodamientos grandes sólo se deben almacenar en posición horizontal, preferiblemente apoyando toda la extensión de sus caras laterales. Si se conservan en posición vertical, el peso de los aros y de los elementos rodantes puede causar deformaciones permanentes, ya que las paredes de los rodamientos son relativamente delgadas.

### **8.5 Inspección y limpieza**

Al igual que los demás componentes mecánicos importantes, los rodamientos de bolas y de rodillos, se deben limpiar y examinar con frecuencia. Los intervalos entre las inspecciones dependen totalmente de las condiciones de funcionamiento.

Si es posible determinar el estado del rodamiento durante el funcionamiento, por ejemplo, escuchando el sonido del rodamiento y midiendo la temperatura o examinando el lubricante, suele bastar con una limpieza e inspección anual de los rodamientos (aros, jaula y elementos rodantes) y los otros componentes de la disposición de rodamientos.

Si las cargas son elevadas, las inspecciones deben ser más frecuentes, por ejemplo, los rodamientos de las máquinas de laminación suelen ser inspeccionados cuando se cambian los rodillos de las mismas.

Después de limpiar los componentes del rodamiento con un disolvente adecuado (trementina o parafina), éstos se deben lubricar inmediatamente con aceite o con grasa para evitar la corrosión. Esto es especialmente importante para los rodamientos montados en máquinas que van a mantenerse en desuso durante largos períodos de tiempo.





## CONCLUSIONES

1. Con el anterior trabajo de graduación se ha logrado conocer e identificar plenamente los diferentes factores que han de tomarse en cuenta para la adecuada y eficaz selección de un rodamiento.
2. Se ha obtenido un mejor conocimiento en lo que a materia de rodamientos respecta, así como las correctas aplicaciones de los mismos.
3. Todas las máquinas que tienen piezas giratorias, utilizan rodamientos y estos deben de estar siempre en perfectas condiciones de funcionamiento para evitar cualquier desperfecto en las mismas.
4. En los departamentos de mantenimiento de las empresas guatemaltecas hay poca información sobre los correctos hábitos a seguir para el montaje o desmontaje de los rodamientos.
5. Los rodamientos dan varios resultados de funcionamiento al momento de someterlos a pruebas de rendimiento, esto ocasionado por las diferentes condiciones ambientales en las que operan, por lo que la mayoría de veces los datos obtenidos son un promedio.



## RECOMENDACIONES

1. Es aconsejable ejecutar las lubricaciones adecuadas en los rodamientos según sean las necesidades que se tengan, esto nos ayudará a un mejor desempeño en las máquinas y además en un ahorro de energía, ya que las pérdidas por exceso de fricción se verán reducidas al mínimo.
2. Se deben realizar inspecciones periódicas a los rodamientos y llevar una bitácora de mantenimiento y vida útil, ya que esto ayudará para conocer si se está seleccionando correctamente los rodamientos.
3. Es preciso programar mantenimientos preventivos, por lo menos una vez al año, limpiar completamente los rodamientos y colocarle lubricante nuevo, esto para alargar la vida de los mismos.
4. Se aconseja la capacitación de todo el personal de mantenimiento para que utilicen los principios correctos en el manejo, instalación, lubricación y todos los procesos que tengan que ver con los rodamientos en general.
5. Cuando se seleccione un rodamiento, se debe tener especial cuidado para que esté dentro de los parámetros aceptables de la aplicación que consideramos correcta.

6. Verificar siempre los datos del fabricante del rodamiento, en cuanto a tipos de lubricante y períodos de lubricación se refiere, ya que por los tipos de material que se utilizan en el mercado pueda ser que varíen de una marca a otra.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Resnick, Robert y Halliday, David **Física**. Tercera edición. Editorial Continental, México 1994.
2. Thomson, William T. **Teoría de vibraciones**. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, USA 1983.
3. **Catálogo General SKF**. Publicación 6000 ES, Segunda edición en español, Suecia 2006.
4. **General Catalogue SKF**. Catalogue 5000 E, 4<sup>th</sup> Edition, Germany. June 2003.
5. **Timken Spherical Roller Bearing Interactive Catalog**. The Timken Company, U.S.A. 2007.

### Sitios de internet

6. <http://members.fortunecity.es/100pies/Lubricantes/grasas1.html> (09/2009)
7. [www.ingenieria.unam.mx/~deptoestructuras/cargaaxial.html](http://www.ingenieria.unam.mx/~deptoestructuras/cargaaxial.html) (09/2009)
8. [www.toolingu.com/definicion-201210-6138-fluidosmiscibles.html](http://www.toolingu.com/definicion-201210-6138-fluidosmiscibles.html) (09/2009)