

Duración de vida

Duración de vida nominal	56
■ Tipos de deterioros	56
■ Fórmulas de base	58
■ Carga dinámica de base del rodamiento	59
■ Carga dinámica equivalente P	60
■ Definiciones	61
<i>Factor de carga axial Y</i>	61
■ Definición de la capacidad estática	61
■ Carga estática equivalente	63
■ Cargas o velocidades variables	64
■ Cálculo de un eje montado sobre 2 rodamientos de contacto oblicuo	65
<i>Equilibrio radial del eje</i>	65
<i>Equilibrio axial del eje</i>	66
■ Duración de vida requerida	67
Duración de vida nominal corregida	68
■ Fiabilidad de los rodamientos	74
<i>Definición del coeficiente a_1</i>	74
<i>Fiabilidad para una duración de funcionamiento elegida</i>	75
<i>Determinación de a_1 y de la fiabilidad para una duración de vida elegida</i>	75
<i>Duración y fiabilidad de un conjunto de rodamientos</i>	76
■ Influencia de la lubricación	77
<i>Poder separador del lubricante</i>	77
<i>Teoría elasto – hidrodinámica (EHD)</i>	77
<i>Determinación de a_3 lub y de la viscosidad mínima necesaria</i>	78
Parámetros que influyen en la duración de vida	80
■ Influencia de la temperatura	80
<i>Temperaturas de funcionamiento normales</i>	80
■ Influencia del juego de funcionamiento	81
<i>Rodamiento de contacto radial bajo carga radial</i>	81
<i>Rodamiento de contacto oblicuo bajo carga radial y axial</i>	81
■ Influencia de una carga excesiva	82
■ Influencia de defectos de forma y posición de los asientos	82
<i>Defectos de forma</i>	82
<i>Defectos de alineamiento</i>	82
Rozamiento y velocidad de rodamientos	84
■ Rozamiento	84
■ Velocidad de rodamientos	85
<i>Teoría de la norma ISO 15312</i>	85
<i>Teoría de SNR</i>	87

Duración de vida nominal

Tipos de deterioros

La medida principal de la eficacia de un rodamiento es su duración de vida, es decir, el número de vueltas que puede efectuar antes de mostrar el primer signo de exfoliación.

Además de los deterioros del tipo “gripado” que pueden ser la consecuencia de una lubricación insuficiente en términos de caudal, los principales deterioros encontrados pueden ser clasificados en 3 categorías:

- exfoliación profunda iniciada en profundidad (EPIP)
- exfoliación superficial iniciada en superficie (ESIS)
- exfoliación profunda iniciada en superficie (EPIS)

■ Exfoliación profunda iniciada en profundidad (EPIP)

Se trata del deterioro “convencional” de un rodamiento que funciona en condiciones normales, es decir en presencia de una película de aceite que separe las superficies en contacto (cuerpos rodantes/pista de rodadura).

El principio de construcción del rodamiento conduce a contactos entre cuerpos rodantes y anillos que soportan muy fuertes cargas específicas.

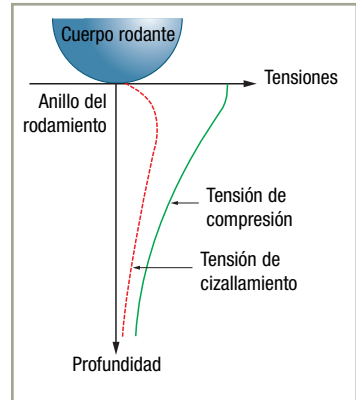
Las presiones de Hertz (figura lateral) a este nivel tienen como consecuencia:

- tensiones de compresión, máximas en superficie cuyo valor puede alcanzar 3500 N/mm^2
- tensiones de cizallamiento, máximas en sub – capa cuyo valor puede alcanzar 1000 N/mm^2

En condiciones de medio lubricado limpio, (ver página 77) tipo EHD, las tensiones alternas a las que se someten las pistas de rodadura conducen en mayor o menor plazo a la aparición de una fisura en el seno del material. Esta se inicia a partir de inclusiones situadas en sub – capa en la zona donde las tensiones de Hertz son máximas.

La fisura aparece en la matriz cercana a una inclusión.

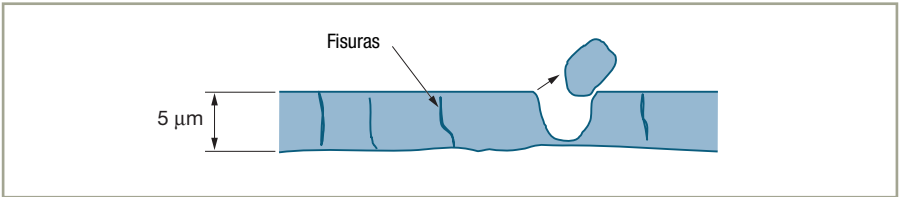
La fisura se propaga hacia la superficie hasta provocar el desgaje de una partícula de acero, primera manifestación de la avería por exfoliación.



■ Exfoliación superficial iniciada en superficie (ESIS)

En presencia de pequeñas partículas (de algunas μm a $50 \mu\text{m}$) duras (superior a la dureza de los elementos del rodamiento, es decir, 700 HV_{10}), se constata un desgaste de los elementos del rodamiento debido al contacto metal/metal, consecuencia de una lubricación heterogénea en este punto sensible.

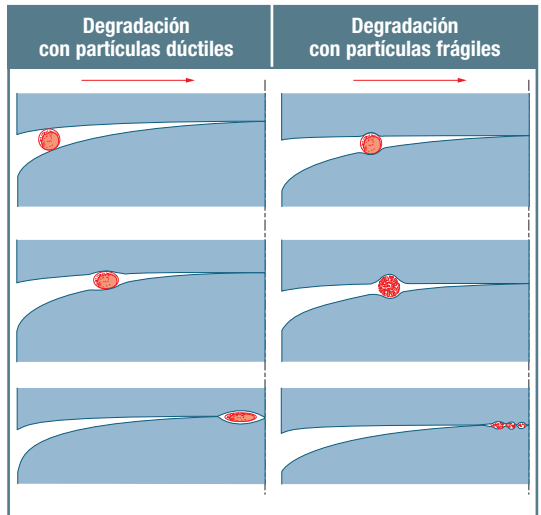
Esto conlleva el deterioro de las superficies activas bajo una forma de exfoliación muy superficial también llamada “peladura” de algunas decenas de micras de profundidad y que afecta a una amplia superficie de las pistas de rodadura. Este proceso de degradación es lento. Es de la misma naturaleza que el ocasionado por una película de aceite insuficiente a partir de una viscosidad escasa.



■ Exfoliación profunda iniciada en superficie (EPIS)

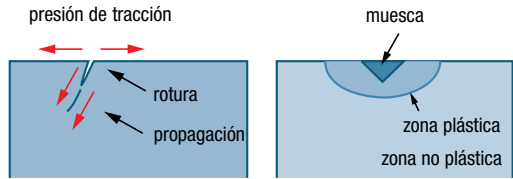
Cuando la polución se compone de partículas mayores (de $20 \mu\text{m}$ a $300 \mu\text{m}$, o incluso más grandes), el paso de la partícula entre el cuerpo rodante y el anillo rodante conlleva una deformación plástica local de la pista de rodadura. El efecto de esta polución es diferente según su dureza.

Si la partícula es lo suficientemente dúctil, puede deformarse plásticamente adoptando formas redondeadas sin romperse, por el contrario, si esta polución es frágil, se rompe pasando al seno del contacto, deformando plásticamente los elementos del rodamiento. Estos nuevos fragmentos se comportan entonces según el 2º mecanismo ESIS anteriormente descrito. Se asiste entonces a una competición entre la degradación causada por la deformación plástica local debida al clavado de partículas y la causada por el desgaste abrasivo provocado por los fragmentos de dichas partículas.



Duración de vida nominal

En el caso de una muesca, la exfoliación no se inicia directamente en el perímetro de esta. Se constata una zona protegida en el volumen deformado plásticamente y la fisura nace más allá de esta zona y conlleva una exfoliación profunda iniciada en superficie. (EPIS).



Habida cuenta de la diversidad de partículas que constituyen la polución encontrada en un aceite de órgano mecánico y de su evolución granulométrica en estado nuevo y tras rodaje, y considerando igualmente la naturaleza del cuerpo rodante (rodillos o bolas), que se ve más o menos afectada por el fenómeno de deslizamiento, el deterioro encontrado es muy a menudo uno mixto entre el tipo ESIS y el EPIS.

Fórmulas de base

La duración de vida de un rodamiento puede calcularse de forma más o menos precisa según las condiciones de funcionamiento definidas.

El método más simple, preconizado por la norma ISO 281, permite calcular la duración de vida alcanzada por el 90% de los rodamientos que trabajan bajo carga dinámica.

➔ El método de cálculo simplificado siguiente se apoya sobre la fatiga del material como causa de fallo (Exfoliación tipo EPIP)

■ Para determinar la duración de vida simplificada según la norma ISO 281, se calcula:

► La carga radial dinámica equivalente P

$$P = X \cdot F_r + Y \cdot F_a$$

► La duración nominal L_{10}

$$L_{10} = (C / P)^n \cdot 10^6 \text{ en vueltas}$$

o

$$L_{10} = (C / P)^n \cdot 10^6 / 60N \text{ en horas}$$

n : 3 para los rodamientos de bolas

n : 10/3 para los rodamientos de rodillos

Vemos que: si $P = C$, $L_{10} = 1$ millón de vueltas

Es por tanto la carga bajo la cual los rodamientos tienen una duración de vida nominal de un millón de vueltas.

Se llama también capacidad de carga dinámica.

Carga dinámica de base del rodamiento

■ La carga dinámica de base del rodamiento definido en la lista de Rodamientos Estándar se calcula según la norma ISO 281 siguiendo las fórmulas:

Rodamientos de bolas (para diámetro de bola < 25,4 mm)	$C = f_c(i \cdot \cos\alpha)^{0,7} Z^{2/3} \cdot D_w^{1,8}$
--	---

Rodamientos de rodillos	$C = f_c(i \cdot l \cdot \cos\alpha)^{7/9} Z^{3/4} \cdot D_w^{29/27}$
-------------------------	---

Rodamientos axiales de bolas (para diámetro de bola < 25,4 y $\alpha = 90^\circ$)	$C = f_c \cdot Z^{2/3} \cdot D_w^{1,8}$
---	---

■ Nota

► A notar que el exponente que afecta al diámetro D_w del cuerpo rodante es superior al concerniente a su número Z .

No se puede por tanto comparar la capacidad de dos rodamientos del mismo símbolo pero de definición interna diferente teniendo en cuenta solamente el número de cuerpos rodantes. Hay que hacer intervenir los otros parámetros que entran en la fórmula de cálculo.

► Capacidad de carga de los rodamientos dobles

En lo que concierne a los rodamientos de dos hileras de cuerpos rodantes ($i = 2$) o bien a los conjuntos formados por dos rodamientos idénticos, la capacidad (C_e) del conjunto es aquella (C) de una hilera multiplicada por:

para conjuntos de bolas	$2^{0,7} = 1,625$
-------------------------	-------------------

para conjuntos de rodillos	$2^{7/9} = 1,715$
----------------------------	-------------------

Vemos entonces que el hecho de doblar un rodamiento mejora la capacidad de carga del soporte en un 62,5 o 71,5% según el tipo empleado. La capacidad de carga, y por tanto la duración de vida, no se doblan.

Duración de vida nominal

Carga dinámica equivalente P

$$P = X \cdot F_r + Y \cdot F_a$$

X y Y = factores de carga definidos en la tabla siguiente

F_a y F_r = esfuerzos axial y radial aplicados al rodamiento

Tipo	Sección	Serie	Ángulo de contacto	F _a /C ₀	e	F _a / F _r ≤ e		F _a / F _r > e		
						X	Y	X	Y	
Rodamientos de bolas de contacto radial de 1 o 2 hileras de bolas		60-62-63-64 160-618-619 622-623 42-43		0,014	0,19	1	0	0,56		2,30
				0,028	0,22					1,99
				0,056	0,26					1,71
				0,084	0,28					1,55
				0,110	0,30					1,45
				0,170	0,34					1,31
				0,280	0,38					1,15
				0,420	0,42					1,04
0,560	0,44	1,00								
Rodamientos de bolas de contacto radial de 1 hilera de bolas juego residual superior al juego normal		60-62-63-64 160-618-619 622-623		0,014	0,29	1	0	0,46		1,88
				0,029	0,32					1,71
				0,057	0,36					1,52
				0,086	0,38					1,41
				0,110	0,40					1,34
				0,170	0,44					1,23
				0,280	0,49					1,10
				0,430	0,52					1,01
0,570	0,54	1,00								
Rodamientos de bolas de contacto oblicuo de 1 hilera de bolas		72-73 QJ2-QJ3	40° 30° 35°		1,14	1	0	0,35	0,57	
					0,80	1	0	0,39	0,76	
					0,95	1	0	0,37	0,66	
Rodamientos de bolas de contacto oblicuo de 2 hileras de bolas		32-33 32..A-33..A 52-53 32..B-33..B	35° 25° 32°		0,95	1	0,66	0,60	1,07	
					0,68	1	0,92	0,67	1,41	
					0,86	1	0,73	0,62	1,17	
Rodamientos de bolas a rótula		12-13 22-23 112-113			Ver lista de Rodamientos	1	Ver lista de Rodamientos	0,65	Ver lista de Rodamientos	
Rodamientos de rodillos cónicos		302-303-313 320-322-322..B 323-323..B 330-331-332			Ver lista de Rodamientos	1	0	0,40	Ver lista de Rodamientos	
Rodamientos de rodillos a rótula		213-222-223 230-231-232 240-241			Ver lista de Rodamientos	1	Ver lista de Rodamientos	0,67	Ver lista de Rodamientos	
Rodamientos de rodillos cilíndricos		N..2-N..3-N..4 N..10 N..22-N..23			-	1	-	1,00	-	
Rodamientos axiales de bolas de efecto simple o doble		511-512-513 514			-	-	-	-	1,00	
Rodamientos axiales de rodillos		293-294			1,82	-	-	1,20	1,00	

Definiciones

→ Factor de carga axial Y

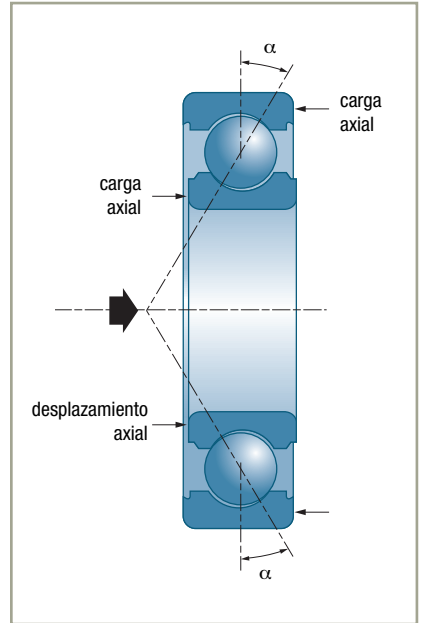
El factor de carga axial Y que depende del ángulo de contacto del rodamiento, se calcula de una forma diferente según el tipo de rodamiento:

■ Rodamientos de bolas de contacto radial

El ángulo de contacto es nulo con sólo una carga radial. Bajo la acción de una carga axial, las deformaciones locales de contacto entre bolas y pistas de rodadura conllevan un desplazamiento axial relativo de los dos anillos. El ángulo de contacto (α) aumenta entonces en función del esfuerzo axial aplicado. La relación F_a/C_0 se utiliza para determinar el valor de Y teniendo en cuenta entonces la modificación del ángulo de contacto debido al esfuerzo axial.

■ Rodamientos de contacto angular

El ángulo de contacto viene dado por construcción y varía poco en función de las cargas combinadas. El factor de carga axial Y para un ángulo de contacto dado se considera en una primera aproximación como constante. Los rodamientos de bolas de contacto oblicuo, con un ángulo de contacto idéntico para todos los rodamientos, se calculan con el mismo factor de carga Y . Para los rodamientos de rodillos cónicos, Y varía siguiendo la serie y la dimensión.



Definición de la capacidad estática

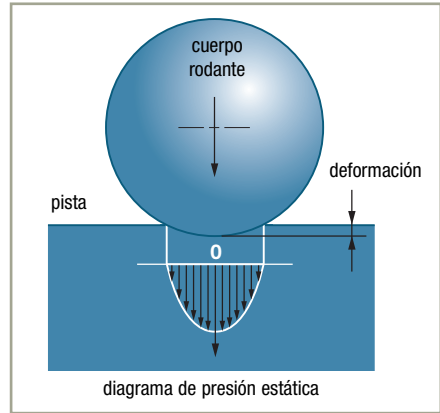
- Las dimensiones del rodamiento deben elegirse a partir de la carga estática cuando:
 - el rodamiento está parado o efectúa débiles movimientos de oscilación y soporta cargas continuas o intermitentes
 - el rodamiento está sometido a golpes durante una rotación normal

Duración de vida nominal

Una carga estática aplicada a un rodamiento puede, dadas las tensiones a nivel de los contactos de los cuerpos rodantes con las pistas, engendrar deformaciones permanentes localizadas perjudiciales para el buen funcionamiento del rodamiento cuando está girando.

Se define entonces una carga radial máxima admisible tal que la tensión resultante en el rodamiento inmóvil pueda ser tolerada en la mayoría de aplicaciones sin que su duración de vida y su rotación se alteren.

El valor C_0 de esta carga máxima admisible se llama capacidad estática de base del rodamiento (o carga estática).



■ Capacidad estática de base de un rodamiento C_0

Se define por la Norma ISO 76 como la carga radial (axial para los rodamientos axiales) que crea al nivel del contacto (cuerpo rodante y pista) más cargado una presión de Hertz de:

- 4200 MPa para los rodamientos de bolas (de todos tipos, salvo rodamientos de bolas a rótula)
- 4600 MPa para los rodamientos de bolas a rótula
- 4000 MPa para los rodamientos de rodillos (de todos tipos)

$$1\text{MPa} = 1\text{MegaPascal} = 1 \text{ N/mm}^2$$

■ Carga estática equivalente P_0

En el caso de que el rodamiento esté sometido a cargas estáticas combinadas tales que F_r sea la componente radial y F_a la componente axial, se calcula una carga estática equivalente con el fin de compararla con la capacidad estática del rodamiento.

La capacidad de carga estática del rodamiento debe ser considerada más como un orden de magnitud que como un límite preciso no rebasable.

El factor de seguridad

$$f_s = C_0 / P_0$$

C_0 es la capacidad estática de base definida en las tablas de características de los rodamientos.

Valores de principio mínimos para el coeficiente de seguridad f_s :

- 1,5 a 3 para exigencias severas
- 1,0 a 1,5 para condiciones normales
- 0,5 a 1 para funcionamientos sin exigencias de ruido o precisión

Si se desea un rodamiento que gire con exigencias de silencio de funcionamiento severas, el coeficiente de seguridad f_s debe ser importante.

Carga estática equivalente

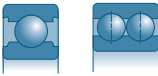








La carga estática equivalente es el mayor de los dos valores

$$P_0 = F_r$$

$$P_0 = X_0 \cdot F_r + Y_0 \cdot F_a$$

F_r y F_a son los esfuerzos estáticos aplicados.

■ Los coeficientes X_0 y Y_0 se definen en la tabla siguiente:

Tipo	Sección	Serie	Angulo de contacto	X_0	Y_0
Rodamientos de bolas de contacto radial con 1 o 2 hileras de bolas		60-62-63-64 160-618-619-622 623 42-43		0,6	0,5
Rodamientos de bolas de contacto oblicuo de 1 hilera de bolas		72 - 73	40°	0,5	0,26
		QJ2 - QJ3	35°	0,5	0,29
Rodamientos de bolas de contacto oblicuo de 2 hileras de bolas		32 - 33	35°	1,0	0,58
		32..A - 33..A	25°	1,0	0,76
		52 - 53 32B - 33B	32°	1,0	0,63
Rodamientos de bolas a rótula		12 - 13 22 - 23 112 - 113		0,5	Ver lista de Rodamientos
Rodamientos de rodillos cónicos		302 - 303 - 313 320 - 322 - 322..B 323 - 323..B - 330 331 - 332		1,0	
Rodamientos de rodillos a rótula		213 - 222 - 223 230 - 231 - 232 240 - 241		1,0	
Rodamientos de rodillos cilíndricos		N..2 - N..3 - N..4 N..10 N..22 - N..23		1,0	0
Rodamientos axiales de bolas de efecto simple		511 - 512 - 513 514		0	1
Rodamientos axiales de rodillos a rótula		293 - 294		2,7 si $F_r / F_a < 0,55$	1

Duración de vida nominal

Cargas o velocidades variables

■ Cuando un rodamiento funciona bajo cargas o velocidades variables, hay que determinar una carga y una velocidad equivalentes para poder calcular la duración de vida.

► Carga constante y velocidad de rotación variable

Velocidad equivalente $N_e = t_1 \cdot N_1 + t_2 \cdot N_2 + \dots + t_z \cdot N_z$ con $\sum_{i=1}^z t_i = 1$

► Carga variable y velocidad de rotación constante

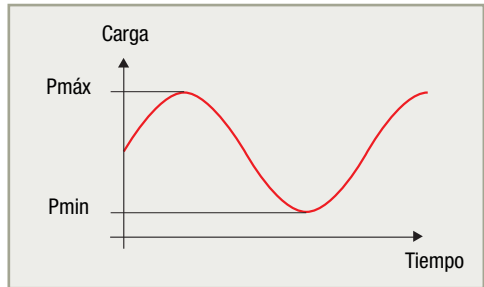
Carga equivalente $P_e = (t_1 \cdot P_1^n + t_2 \cdot P_2^n + \dots + t_z \cdot P_z^n)^{1/n}$ con $\sum_{i=1}^z t_i = 1$

► Carga periódica y velocidad de rotación constante

Carga equivalente

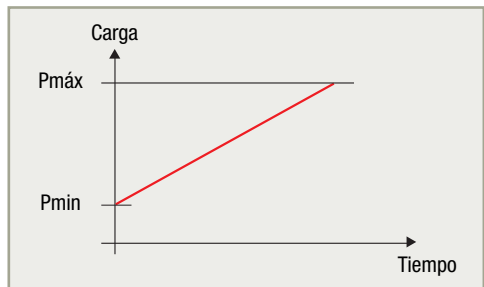
- Carga sinusoidal

$$P_e = 0,32 P_{min} + 0,68 P_{max}$$



- Carga lineal

$$P_e = 1 / 3 (P_{min} + 2 P_{max})$$



■ Si la velocidad y la carga son variables, se calcula la duración de vida para cada tasa de utilización y luego la duración ponderada para el conjunto del ciclo.

► **Carga y velocidad de rotación variables**

Duración ponderada $L = (t_1 / L_1 + t_2 / L_2 + \dots + t_z / L_z)^{-1}$ con $\sum_{i=1}^z t_i = 1$

con:

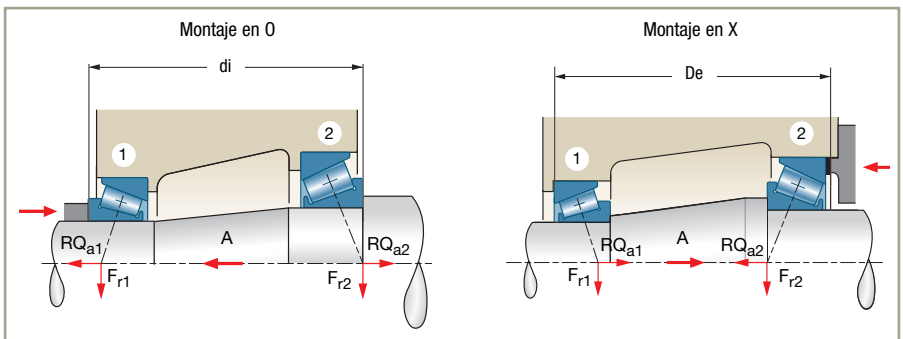
- t_i Tasa de utilización
- N_i Velocidad de rotación para la tasa de utilización t_i
- P_i Carga para la tasa de utilización t_i
- L_i Duración de vida para la tasa de utilización t_i
- n 3 para los rodamientos de bolas
- n 10/3 para los rodamientos de rodillos

Cálculo de un eje montado sobre 2 rodamientos de contacto angular

Eje montado sobre 2 rodamientos simples no precargados sometidos a esfuerzos axiales y radiales.

→ **Equilibrio radial del eje**

■ Cálculo de los esfuerzos radiales F_{r1} y F_{r2} aplicados en los puntos de aplicación de las cargas de los rodamientos por equilibrio radial estático del eje.



Duración de vida nominal

→ Equilibrio axial del eje

■ Al estar las pistas de los rodamientos de contacto angular inclinadas, las cargas radiales F_{r1} y F_{r2} producen una fuerza de reacción axial llamada “fuerza axial inducida”.

Si el rodamiento 1 es aquél cuya fuerza axial inducida tiene el sentido de la fuerza axial exterior A , el equilibrio del eje es:

$$A + RQ_{a1} = RQ_{a2}$$

Con RQ_{a1} y RQ_{a2} : cargas axiales aplicadas a los rodamientos calculadas en las tablas siguientes:

► Caso de carga:

$$A + (F_{r1} / 2 Y_1) > (F_{r2} / 2 Y_2)$$

el rodamiento 1 funciona con juego

	Rodamiento 1	Rodamiento 2
Carga axial aplicada	$RQ_{a1} = F_{r1} / 2 Y_1$	$RQ_{a2} = A + (F_{r1} / 2 Y_1)$
Carga axial utilizada en el cálculo de la carga dinámica equivalente	$F_{a1} = 0$	$F_{a2} = RQ_{a2}$

► Caso de carga:

$$A + (F_{r1} / 2 Y_1) < (F_{r2} / 2 Y_2)$$

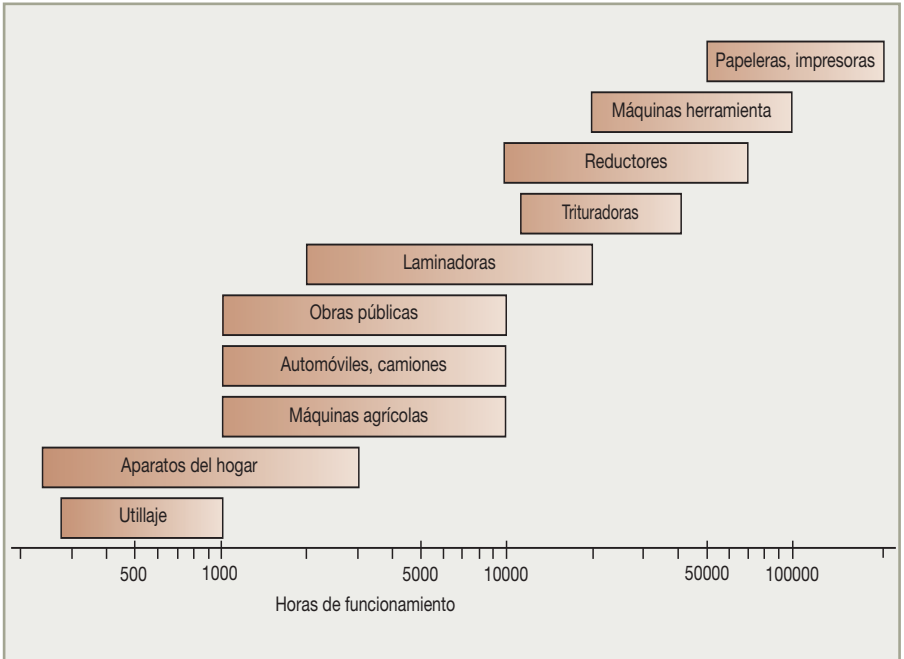
el rodamiento 2 funciona con juego

	Rodamiento 1	Rodamiento 2
Carga axial aplicada	$RQ_{a1} = (F_{r2} / 2 Y_2) - A$	$RQ_{a2} = F_{r2} / 2 Y_2$
Carga axial utilizada en el cálculo de la carga dinámica equivalente	$F_{a1} = RQ_{a1}$	$F_{a2} = 0$

Duración de vida requerida

■ La duración de vida requerida del rodamiento viene fijada por el constructor del equipamiento en el que se incluye el rodamiento.

A título de ejemplo, mostramos a continuación los órdenes de magnitud de las duraciones de vida de las máquinas más comunes:



Duración de vida nominal corregida

■ La duración nominal de base L_{10} es a menudo una estimación satisfactoria de las prestaciones de un rodamiento. Esta duración se entiende para una fiabilidad del 90 % y en condiciones de funcionamiento convencionales. En determinadas aplicaciones puede ser necesario calcular la duración para un nivel de fiabilidad distinto o para condiciones con lubricación o contaminación.

Con los aceros para rodamientos modernos de alta calidad, es posible que con una carga moderada y en condiciones de funcionamiento favorables, se consigan duraciones de vida muy largas en comparación con la duración L_{10} . También puede darse una duración más corta que L_{10} en condiciones de funcionamiento desfavorables.

Por debajo de una cierta carga C_U , un rodamiento moderno de alta calidad puede llegar a una duración infinita, si las condiciones de lubricación, la limpieza y otras condiciones de funcionamiento son favorables.

Esta carga C_U puede determinarse con precisión en función de los tipos de rodamiento y de las formas internas del mismo, del perfil de los elementos rodantes y de las pistas de rodadura, así como del límite de fatiga del material de la pista. A partir de la capacidad estática del rodamiento puede obtenerse una aproximación suficiente.

■ La Norma internacional ISO 281 introduce un factor de corrección de duración, a_{ISO} que permite calcular una duración de vida nominal corregida según la fórmula:

$$L_{nm} = a_1 a_{ISO} L_{10}$$

Este coeficiente permite estimar la influencia de la lubricación y la contaminación en la duración del rodamiento. Tiene en cuenta el límite de fatiga del acero del rodamiento.

El método de evaluación de a_{ISO} definido por ISO 281 es bastante difícil de aplicar para un usuario no especializado, por lo que SNR ha buscado una mejor forma de proporcionar a sus clientes un medio sencillo de determinación de a_{ISO} aplicando la hipótesis que la carga de fatiga C_U depende directamente de la capacidad estática del rodamiento y que el factor de contaminación es constante, con independencia de las condiciones de lubricación y del diámetro medio del rodamiento.

El método propuesto por SNR permite una evaluación rápida, en modo gráfico, del coeficiente a_{ISO} .

Nuestros ingenieros están a su disposición para determinar de forma más precisa este coeficiente si es necesario.

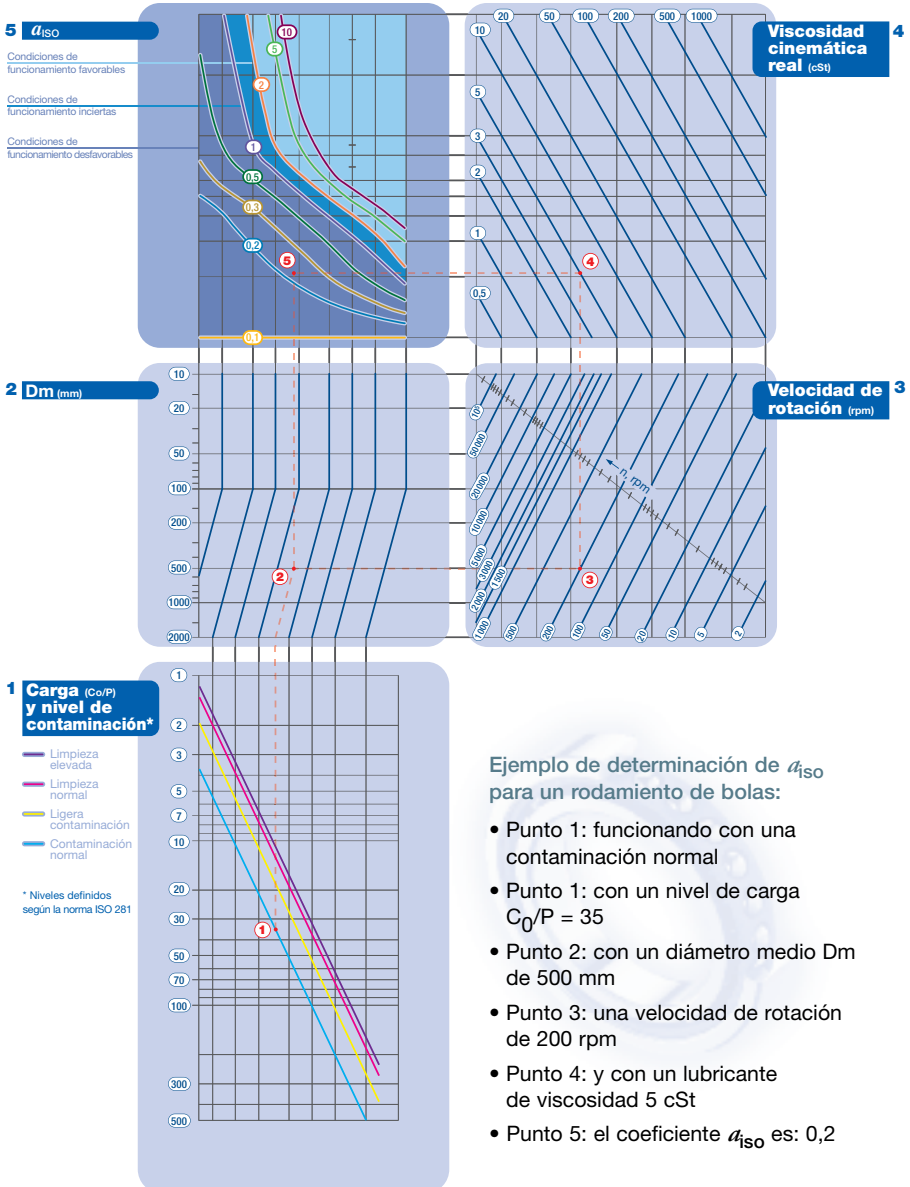
Los cuatro diagramas de las páginas siguientes permiten determinar a_{ISO} para los rodamientos de bolas, los rodamientos de rodillos, los rodamientos axiales de bolas y los rodamientos axiales de rodillos siguiendo el método mostrado a continuación:

■ Método de determinación de a_{ISO} (Norme ISO 281)

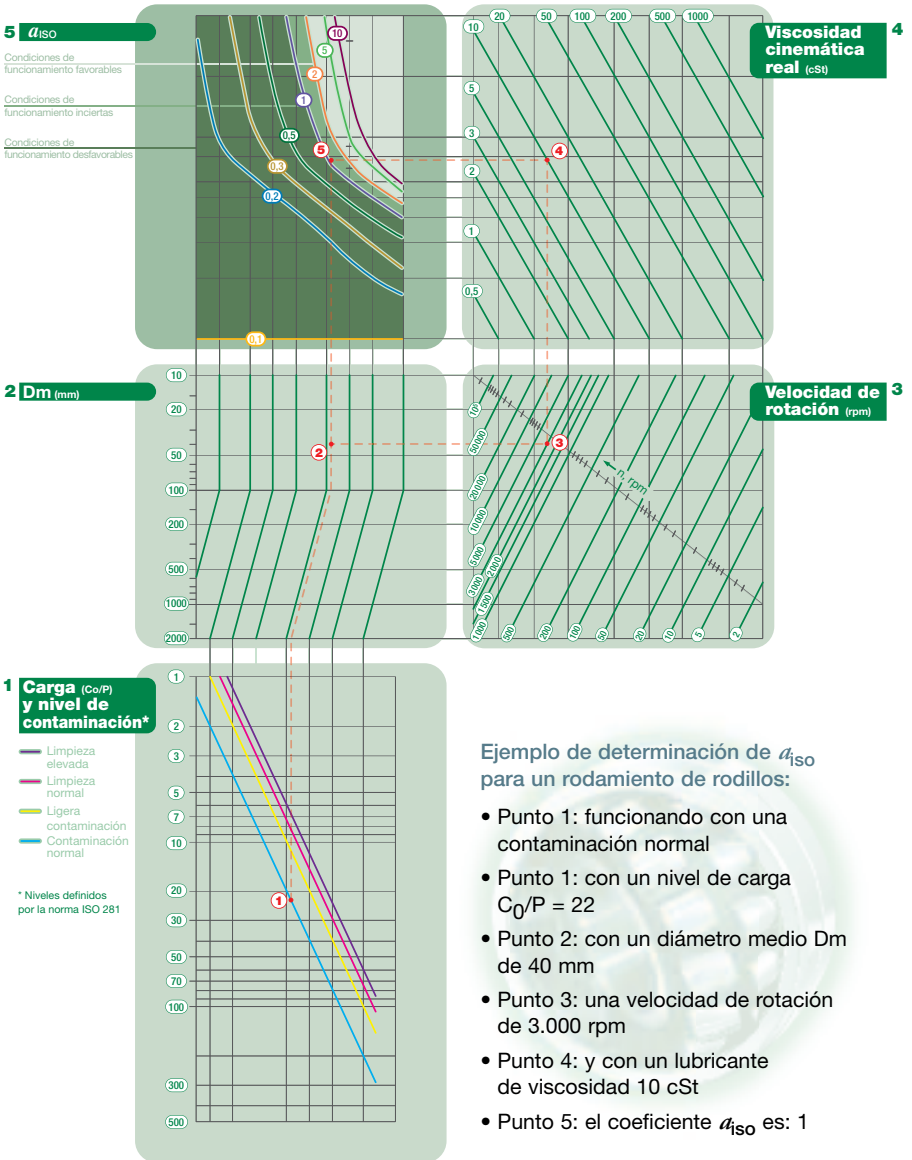
1. Definir la viscosidad del lubricante a la temperatura de funcionamiento a partir del diagrama de la página 78.
Tomar la viscosidad del aceite de base para los rodamientos engrasados.
2. Definir el nivel de contaminación:
 - ▶ **Limpieza elevada**
Aceite filtrado a través de un filtro extremadamente fino; condiciones habituales de los rodamientos engrasados por vida y estancos.
 - ▶ **Limpieza normal**
Aceite filtrado a través de un filtro fino, condiciones habituales de los rodamientos engrasados por vida y con deflector.
 - ▶ **Ligera contaminación**
Ligera contaminación en el lubricante.
 - ▶ **Contaminación normal**
Aceite con un filtrado basto, partículas de desgaste o partículas procedentes del medio ambiente.
Condiciones habituales de los rodamientos engrasados sin juntas de estanqueidad integradas
 - ▶ Para una **contaminación severa**, considerar que a_{ISO} será inferior a 0,1.
3. A partir de los cambios aplicados al rodamiento, calcular la carga equivalente P y la relación de Capacidad estática/carga equivalente: C_0 / P .
4. En el gráfico correspondiente al tipo de rodamiento que se va a calcular, definir el punto A en función del nivel de contaminación y del valor C_0 / P .
5. Definir el punto B a partir del diámetro medio del rodamiento:
 $d_m = (\text{diámetro interior} + \text{diámetro exterior}) / 2$
6. Definir el punto C en función de la velocidad de rotación del rodamiento.
7. Definir el punto D en función de la viscosidad del lubricante a la temperatura de funcionamiento.
8. El punto E de intersección entre las rectas salidas de los puntos B y D define la zona de valor a_{ISO} .

Duración de vida nominal corregida

■ Rodamientos de bolas: estimación del coeficiente a_{ISO}

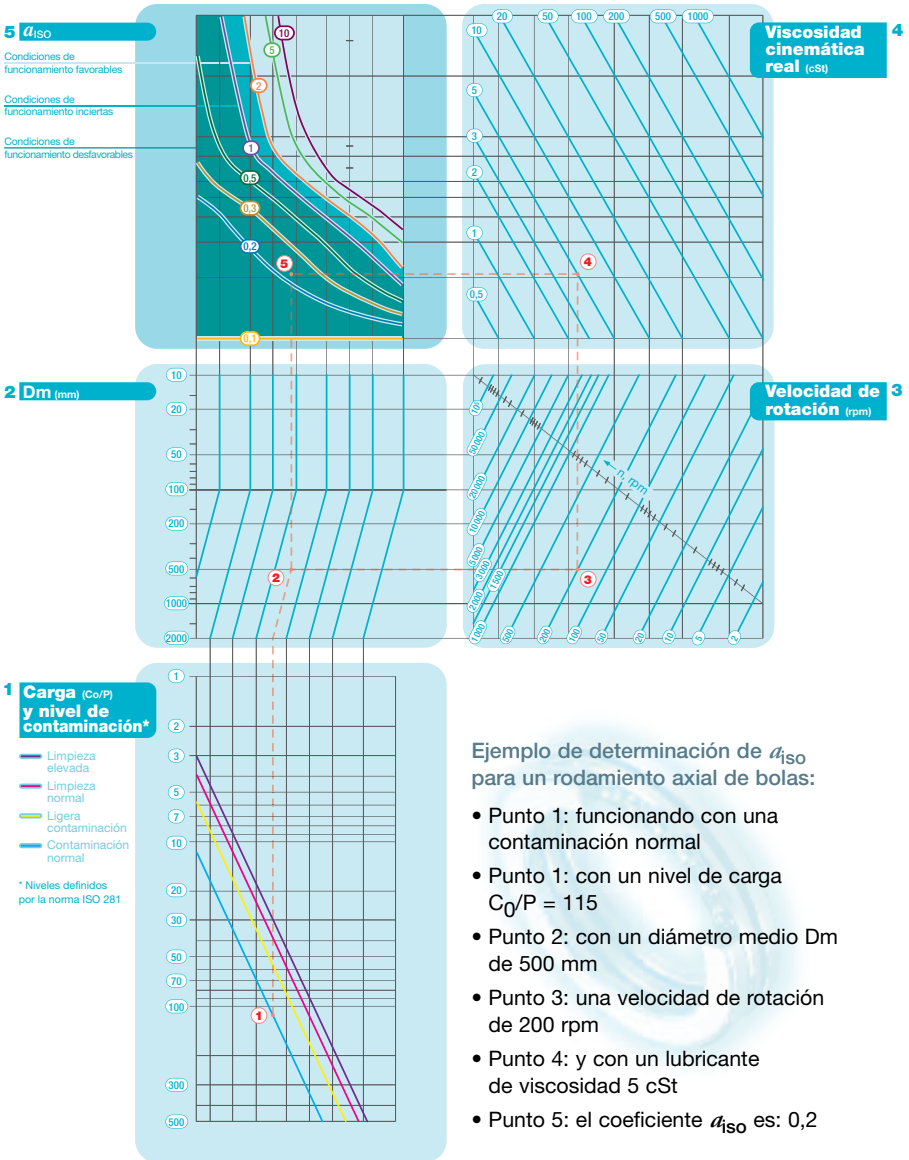


Rodamientos de rodillos: estimación del coeficiente a_{ISO}



Duración de vida nominal corregida

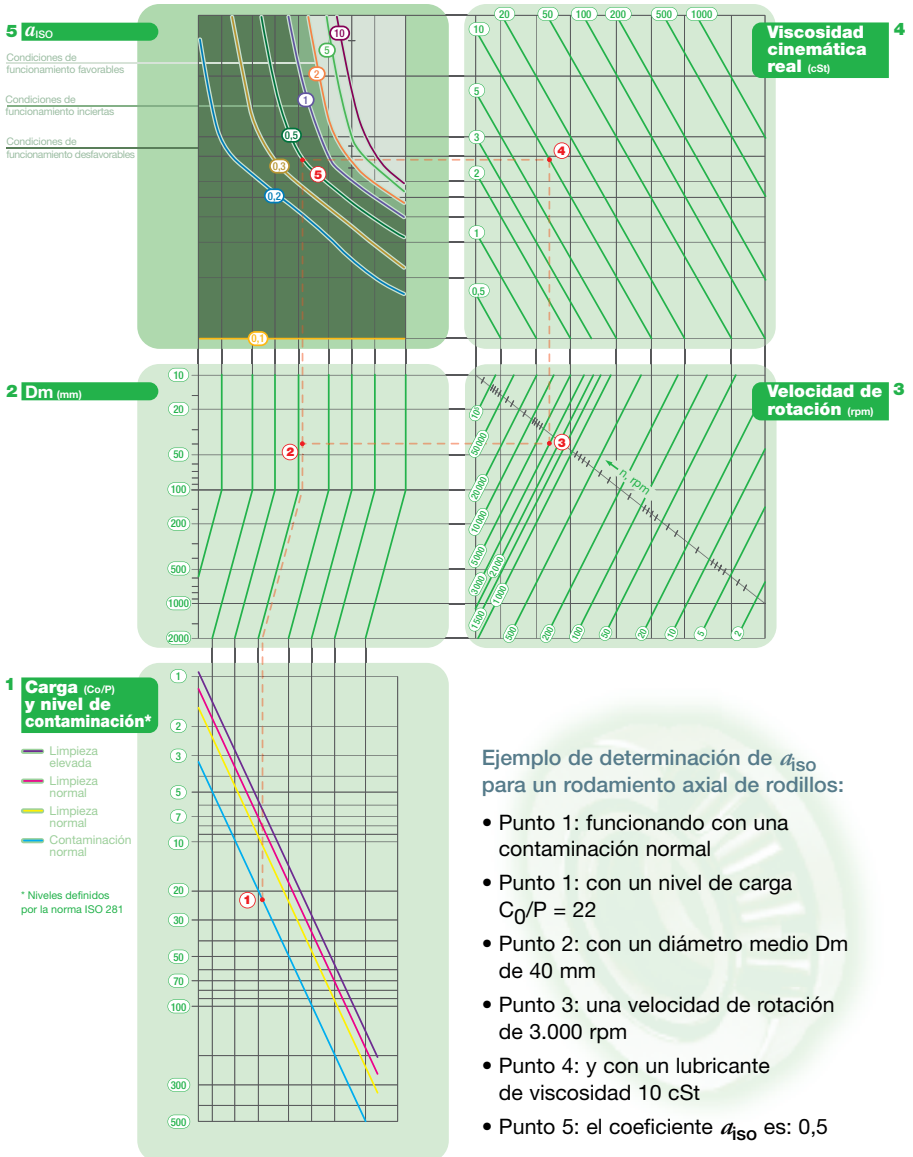
■ Rodamientos axiales de bolas: estimación del coeficiente a_{ISO}



Ejemplo de determinación de a_{ISO} para un rodamiento axial de bolas:

- Punto 1: funcionando con una contaminación normal
- Punto 1: con un nivel de carga $C_0/P = 115$
- Punto 2: con un diámetro medio D_m de 500 mm
- Punto 3: una velocidad de rotación de 200 rpm
- Punto 4: y con un lubricante de viscosidad 5 cSt
- Punto 5: el coeficiente a_{ISO} es: 0,2

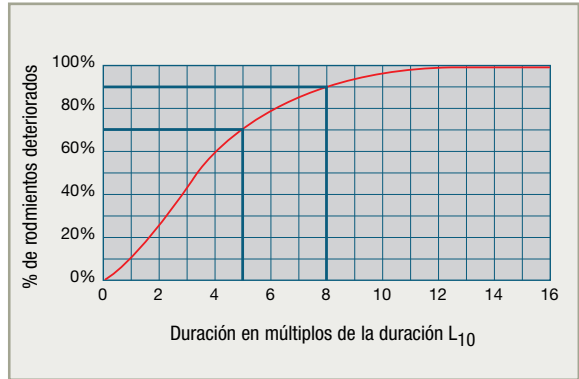
Rodamientos axiales de rodillos: estimación del coeficiente a_{ISO}



Duración de vida nominal corregida

Fiabilidad de los rodamientos

■ Como todo fenómeno de fatiga de material, la aparición de un deterioro de rodamiento presenta un carácter aleatorio. De este modo, rodamientos idénticos fabricados a partir de un mismo lote de material, con características geométricas idénticas, sometidos a condiciones de funcionamiento idénticas (cargas, velocidad, lubricación...) se deterioran tras duraciones de funcionamiento muy diferentes.



La referencia de duración de vida de los rodamientos es la duración L_{10} que corresponde a una fiabilidad del 90% o bien, a la inversa, a una probabilidad de fallo del 10%. Se puede, o bien definir una duración de vida para una fiabilidad diferente gracias al coeficiente a_1 , o bien calcular la fiabilidad F para una duración de funcionamiento determinada.

→ Definición del coeficiente a_1

■ El valor de fiabilidad F para una duración de funcionamiento L se expresa de forma matemática en función de la duración de referencia L_{10}

$$F = \exp \left(\ln 0,9 \left(L / L_{10} \right)^\beta \right)$$

de donde

$$a_1 = (L / L_{10}) = (\ln F / \ln 0,9)^{1/\beta}$$

El coeficiente corrector a_1 ha sido calculado con $\beta=1,5$ (valor medio para todos los rodamientos radiales y axiales).

■ Estos valores de fiabilidad muestran la gran dispersión característica de la duración de vida de los rodamientos:

- aproximadamente el 30% de los rodamientos de un mismo lote alcanzan una duración de vida igual a 5 veces la duración nominal L_{10}
- aproximadamente el 10% alcanzan una duración de 8 veces la duración nominal L_{10} (ver gráfico más arriba indicado)

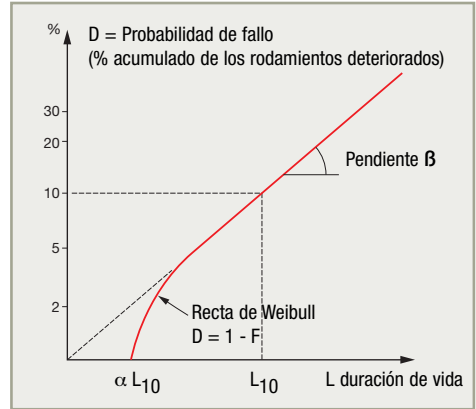
Habida cuenta de este aspecto, el análisis de prestaciones de los rodamientos no puede hacerse más que tras varios ensayos idénticos y sólo el tratamiento estadístico de los resultados permite extraer conclusiones válidas.

→ Fiabilidad para una duración de funcionamiento determinada

■ Es útil a menudo calcular la fiabilidad de un rodamiento para periodos relativamente cortos de su funcionamiento, por ejemplo, la fiabilidad de un órgano para su periodo de garantía L conociendo la duración de vida calculada L_{10}

El análisis de los datos de ensayos efectuados por SNR Rodamientos ha permitido afinar el trazado de la recta de Weibull al nivel de cortas duraciones de funcionamiento.

Contrariamente a lo que expresan las fórmulas precedentes (tenidas en cuenta en la Norma ISO 281 para el cálculo del coeficiente a_1) existe un cierto valor de la duración por debajo del cual los rodamientos no presentan ningún riesgo de fallo (fiabilidad 100%). Este valor es notablemente igual a 2,5% de la duración de vida L_{10} (figura siguiente: αL_{10}).



■ Para tener en cuenta esta realidad en los cálculos de fiabilidad al nivel de cortas duraciones de funcionamiento, SNR Rodamientos utiliza la fórmula precedente corregida por un factor $\alpha = 0,05$

$$F = \exp \left(\ln 0,9 \left(\left(\frac{L}{L_{10}} - \alpha \right)^\beta (1 - \alpha)^{-\beta} \right) \right)$$

A toda fiabilidad F corresponde una probabilidad de fallo $D = 1 - F$

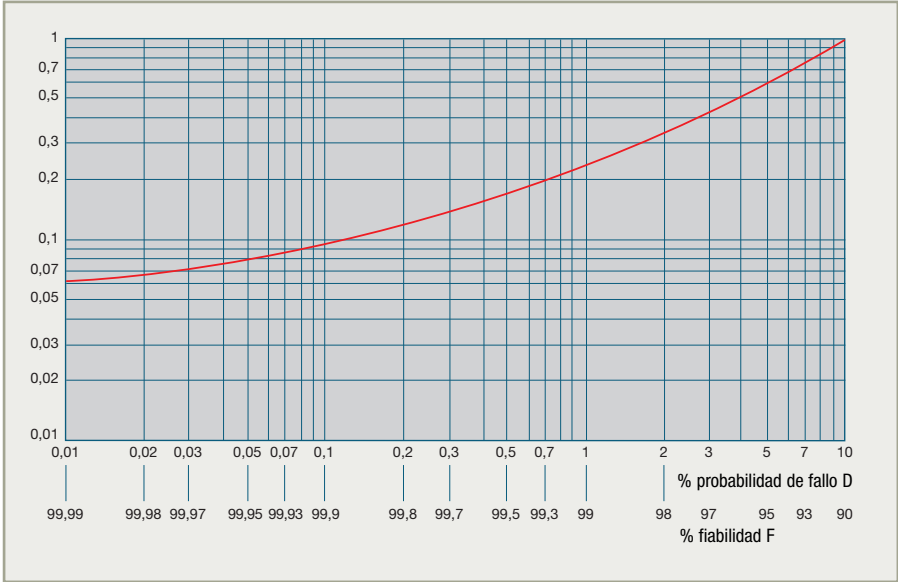
Esta se transcribe sobre un diagrama de Weibull (en coordenadas logarítmicas compuestas) por una recta de pendiente β .

→ Determinación de a_1 y de la fiabilidad para una duración determinada

Fiabilidad 100 %	L_{nm}	a_1
90	L_{10m}	1
95	L_{5m}	0,64
96	L_{4m}	0,55
97	L_{3m}	0,47
98	L_{2m}	0,37
99	L_{1m}	0,25
99,2	$L_{0,8m}$	0,22
99,4	$L_{0,6m}$	0,19
99,6	$L_{0,4m}$	0,16
99,8	$L_{0,2m}$	0,12
99,9	$L_{0,1m}$	0,093
99,92	$L_{0,08m}$	0,087
99,94	$L_{0,06m}$	0,080
99,95	$L_{0,05m}$	0,077

Duración de vida nominal corregida

■ Fiabilidad y probabilidad de fallo para una duración determinada L



➔ Duración y fiabilidad de un conjunto de rodamientos

■ Según la teoría de probabilidades compuestas, la fiabilidad de un conjunto de rodamientos es el producto de las fiabilidades de sus componentes.

$$F = F_1 \times F_2 \times \dots$$

■ De las fórmulas precedentes se deduce la duración de vida L_{10} de un conjunto en función de la duración L_{10} de cada uno de los rodamientos.

$$L_e = (1 / L_1^{1,5} + 1 / L_2^{1,5} + \dots)^{-1/1,5}$$

■ Igualmente, la probabilidad de fallo de un conjunto es, en primera aproximación, la suma de las probabilidades de fallo de cada rodamiento (para valores de fallo muy débiles).

$$D = D_1 + D_2 + \dots$$

➔ Se ve que un conjunto mecánico tendrá una fiabilidad tanto mejor al nivel de los rodamientos cuanto mayor sea la duración de vida individual.

Influencia de la lubricación

El lubricante tiene como función principal separar las superficies metálicas activas del rodamiento manteniendo una película de aceite entre los cuerpos rodantes y sus pistas con el fin de evitar el desgaste y limitar las tensiones anormales y los recalentamientos que pueden resultar del contacto metal sobre metal de los elementos rotatorios.

El lubricante tiene igualmente dos funciones secundarias: enfriar el rodamiento en el caso de lubricación por aceite y evitar la oxidación.

→ Poder separador del lubricante

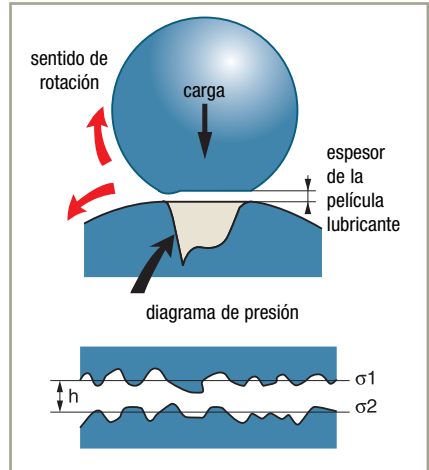
■ En la zona de contacto entre cuerpos rodantes y pista de rodadura, la teoría de Hertz permite analizar las deformaciones elásticas resultantes de las presiones de contacto.

Pese a estas presiones, es posible crear una película de aceite que separe las superficies en contacto. Caracterizamos entonces el régimen de lubricación del rodamiento por la relación del espesor h de la película de aceite sobre la rugosidad equivalente σ de las superficies en contacto.

$$\sigma = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{1/2}$$

σ_1 : rugosidad media de las pistas de rodadura

σ_2 : rugosidad media de los cuerpos rodantes



→ Teoría elasto – hidrodinámica (EHD)

■ La teoría elasto – hidrodinámica tiene en cuenta todos los parámetros que entran en el cálculo de las deformaciones elásticas del acero y de las presiones hidrodinámicas del lubricante y permite una evaluación del espesor de la película de aceite.

Estos parámetros son los siguientes:

- naturaleza del lubricante definida por la viscosidad dinámica del aceite a la temperatura de funcionamiento y su coeficiente piezo – viscoso que caracteriza el aumento de la viscosidad en función de la presión de contacto
- naturaleza de los materiales en contacto definida por su módulo de elasticidad y su coeficiente de Poisson, que caracterizan la amplitud de las deformaciones al nivel de los contactos bajo carga
- la carga sobre el cuerpo rodante más solicitado
- la velocidad
- la forma de las superficies en contacto definida por sus radios de curvatura principales, que caracterizan el tipo de rodamiento utilizado

➔ Aplicada al rodamiento, la teoría EHD permite llegar a hipótesis simplificadoras que hacen constatar que el espesor de la película de aceite no depende apenas más que de la viscosidad del aceite y la velocidad.

Duración de vida nominal corregida

■ Lubricación por aceite

Los ensayos han mostrado que la eficacia de la lubricación definida por la relación h/λ inflúa enormemente sobre la duración de vida efectiva de los rodamientos. Por aplicación de la teoría EHD, se puede verificar la incidencia del régimen de lubricación sobre la duración de vida del rodamiento sobre el diagrama de la página siguiente.

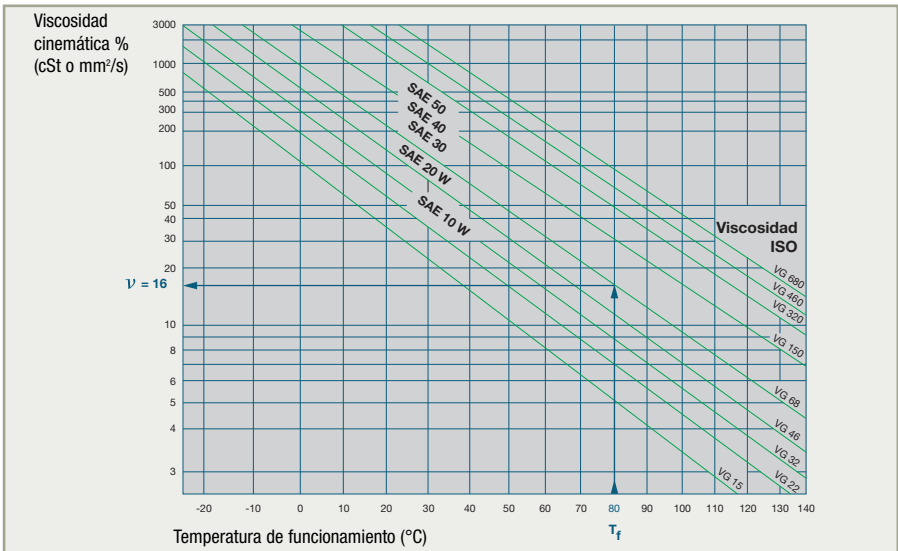
■ Lubricación por grasa

La aplicación de la teoría EHD a la lubricación por grasa es más compleja dados los numerosos componentes de la misma. Los resultados experimentales presentan rara vez una correlación entre sus prestaciones y las características de sus componentes. Resulta que toda preconización de grasa reposa sobre ensayos que pretenden evaluar de forma comparativa los productos ofertados en el mercado. El Centro de Investigación y Ensayos de SNR trabaja en estrecha colaboración con los Centros de Investigación Petrolíferos con el fin de seleccionar y desarrollar las grasas más eficientes.

→ Determinación de la viscosidad mínima necesaria

■ Diagrama viscosidad – temperatura

Los aceites empleados para la lubricación de rodamientos son generalmente aceites minerales con un índice de viscosidad cercano a 90. Los suministradores de dichos aceites dan las características precisas de sus productos, en particular el diagrama viscosidad – temperatura. A falta de este, emplearemos el diagrama general siguiente.

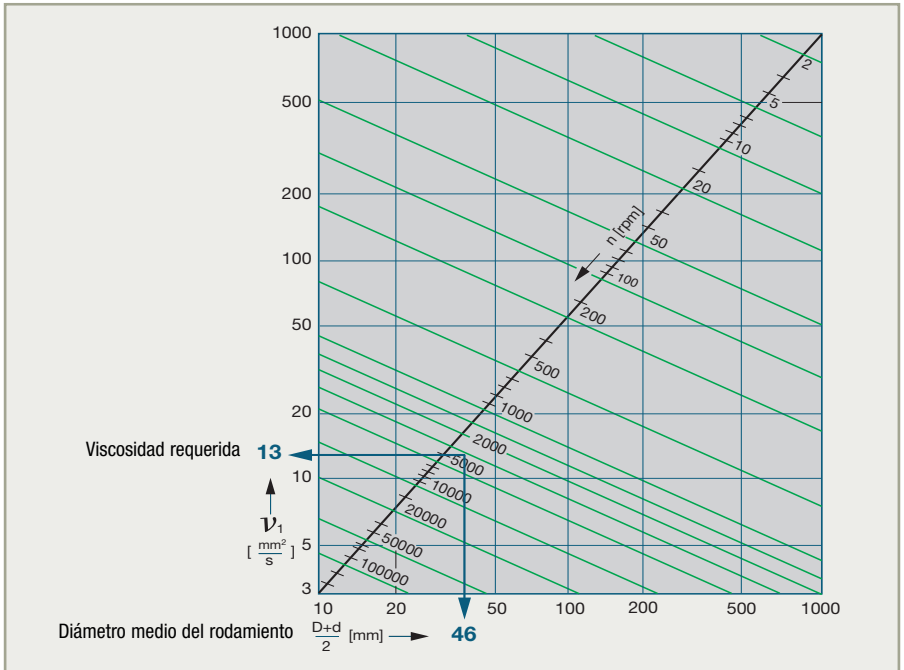


Estando el aceite definido por su viscosidad nominal (en centistokes) a una temperatura nominal de 40°C, se deduce la viscosidad a la temperatura de funcionamiento.

■ Determinación de la viscosidad mínima necesaria

El diagrama siguiente permite determinar la viscosidad mínima necesaria (en cSt) a partir:

- del diámetro medio del rodamiento $D_m = (D+d)/2$
- de la velocidad de rotación n



► Ejemplo :

Rodamiento 6206 a velocidad de 3000 r.p.m. en un aceite VG68 a 80°C.

El diagrama de la página anterior indica que la viscosidad real del aceite a 80°C es 16 cSt.

El diagrama de esta página indica que la viscosidad requerida para un 6206 de diámetro medio $D_m = (D + d)/2 = 46$ mm a 3000 r.p.m. es de 13 cSt.

Parámetros que influyen en la duración de vida

Influencia de la temperatura

→ Temperaturas de funcionamiento normales

■ La temperatura normal de funcionamiento del rodamiento está comprendida entre -20°C y $+120^{\circ}\text{C}$.

Una temperatura fuera de estos límites de funcionamiento tiene incidencia sobre:

- las características del acero,
- el juego interno de funcionamiento,
- las propiedades del lubricante,
- el comportamiento de las juntas,
- el comportamiento de las jaulas de material sintético.

■ Condiciones para el funcionamiento de los rodamientos fuera de los límites de temperatura “normales”

Temperatura de funcionamiento continuo en $^{\circ}\text{C}$

	-40	-20	0	40	80	120	160	200	240
Acero 100 Cr6	Estándar					Disminución de la resistencia a la fatiga			
Juego de funcionamiento	Normal					Juego aumentado			
Grasa	Especial baja temp.	Estándar			Caída de prestaciones		Especial alta temperatura	Lubricación seca	
Junta	Estándar (nitrilo acrílico)								
	Especial (elastómero fluorado)								
Jaula	Poliamida 6/6								
	Metálica								

Influencia del juego de funcionamiento

→ Rodamiento de contacto radial bajo carga radial

■ La carga dinámica de base de un rodamiento se define suponiendo que el juego radial de funcionamiento (juego del rodamiento tras el montaje) es nulo, es decir, que la mitad de los cuerpos rodantes está cargada.



■ La zona de carga varía según el nivel de juego o de precarga.

- Un juego importante (Zona a) hace soportar la carga a un sector reducido del rodamiento
- Una precarga excesiva (Zona b) hace soportar a los cuerpos rodantes una fuerte carga que viene a añadirse a la carga de funcionamiento

En ambos casos, la duración de vida se ve disminuida, aunque una precarga penaliza más que un juego.



→ Rodamiento de contacto oblicuo bajo carga radial y axial

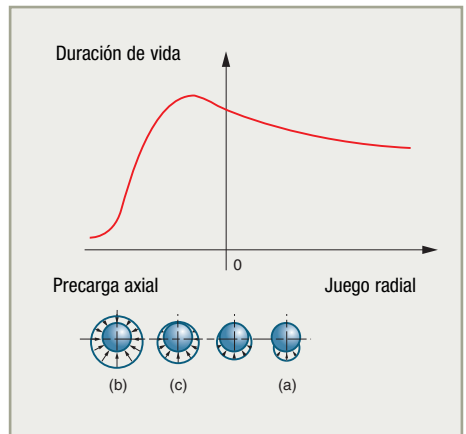
■ La zona de carga varía según el nivel de juego o de precarga.

Una ligera precarga axial (Zona c) aporta una mejor distribución de la carga sobre los cuerpos rodantes y mejora la duración de vida.

Hay que resaltar que un juego axial normal (Zona a) penaliza poco las duraciones de vida, mientras que una precarga excesiva (Zona b) las disminuye fuertemente creando además tensiones anormales, un par de rozamiento elevado y un aumento de temperatura.

Es por esto que la mayoría de los montajes que no necesitan precarga poseen un cierto juego para eliminar estos riesgos y facilitar el reglaje y la lubricación.

La influencia del juego sobre la duración de vida se calcula a partir del juego residual, de la intensidad de las cargas aplicadas y de su dirección. Consultar a SNR.



Parámetros que influyen en la duración de vida

Influencia de una carga excesiva

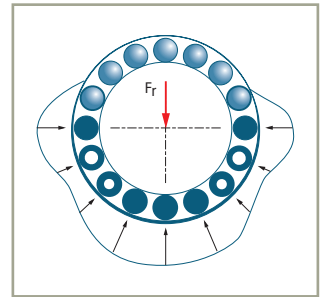
Para cargas muy elevadas, correspondientes aproximadamente a valores $P \geq C / 2$, el nivel de tensiones del acero estándar es tal que la fórmula no representa correctamente la duración nominal con una fiabilidad del 90%. Estos casos de cargas requieren un estudio de aplicación particular de nuestros medios de cálculo.

Influencia de los defectos de forma y posición de los asientos

→ Defecto de forma

■ El rodamiento es una pieza de precisión y el cálculo de su resistencia a la fatiga supone un reparto homogéneo y continuo de la carga entre los cuerpos rodantes.

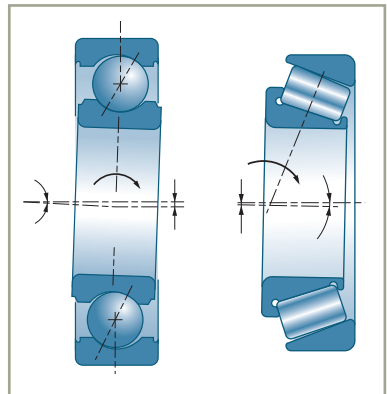
Es necesario calcular las tensiones por elementos finitos cuando el reparto no es homogéneo.



Es importante que los asientos de rodamiento estén mecanizados con un nivel de precisión compatible. Los defectos de forma de los asientos (ovalización, defecto de cilindricidad...) crean tensiones localizadas que disminuyen de forma significativa la duración de vida real de los rodamientos. Las tablas de la página 108 ofrecen determinadas especificaciones de tolerancias de los apoyos y resistencias de los rodamientos.

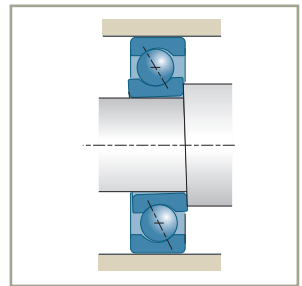
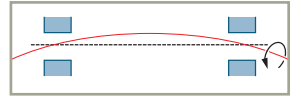
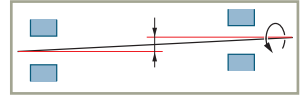
→ Defectos de alineamiento

■ Los defectos de alineamiento sobre rodamientos rígidos (no a rótula) se traducen en un ángulo entre el eje del anillo interior y el del exterior.



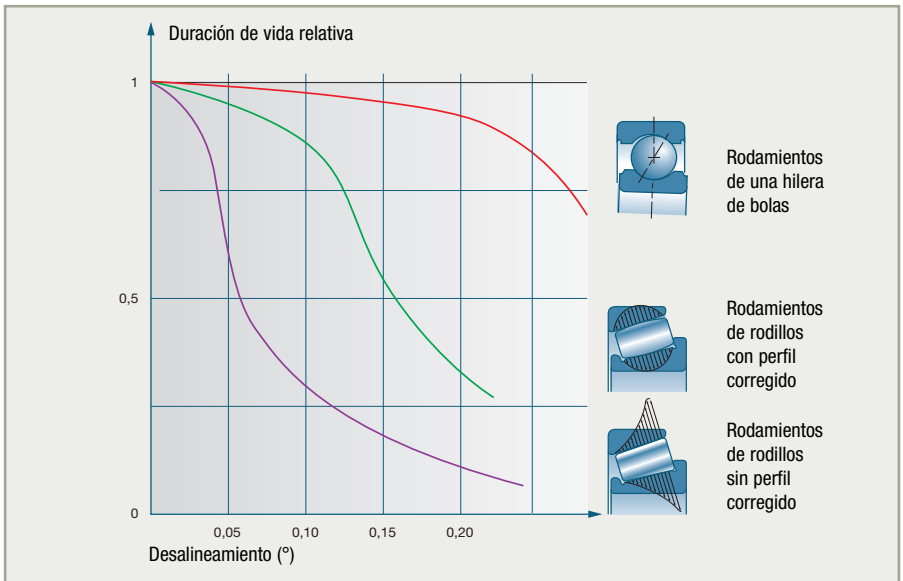
■ Tales defectos pueden provenir de:

- ▶ un defecto de concentricidad entre los dos asientos del eje o los alojamientos
- ▶ un defecto de alineamiento entre el eje del eje y el eje del alojamiento correspondiente de un mismo rodamiento
- ▶ un defecto de linealidad del eje
- ▶ un defecto de perpendicularidad entre los respaldos y los asientos



■ El valor de estos defectos de alineamiento y su influencia sobre la duración de vida de los rodamientos se determina por cálculo. El diagrama adyacente muestra los resultados.

Vemos que la caída de la duración de vida es muy rápida y que se deben mantener los defectos de alineamiento en límites muy estrechos.



Parámetros que influyen en la duración de vida

■ Valor máximo de los defectos de alineamiento admisibles sin penalización significativa de la duración de vida para un juego de funcionamiento normal.

	$F_a / F_r < e$	$F_a / F_r > e$
Rodamiento de una hilera de bolas	0,17°	0,09°
Rodamiento rígido de dos hileras de bolas, Rodamiento de rodillos cilíndricos o cónicos	0,06°	0,06°

Para atenuar la influencia del desalineamiento, se puede emplear un juego aumentado (categoría 3) para los rodamientos de una hilera de bolas. Para los rodamientos de rodillos cilíndricos o cónicos, SNR realiza un abombamiento de la generatriz de los rodillos que mejora el reparto de las tensiones en caso de desalineamiento.

Rozamiento y velocidad de rodamientos

Rozamiento

■ El rozamiento de un rodamiento y su recalentamiento dependen de diversos parámetros: carga aplicada, rozamiento de la jaula, definición interna del rodamiento, lubricación...

Para la mayoría de las aplicaciones por debajo de la velocidad límite y con una cantidad de lubricación no excesiva, el rozamiento en los rodamientos puede calcularse de forma suficientemente precisa con las fórmulas siguientes:

$$M_R = \mu \cdot F \cdot D_m / 2$$

M_R Momento resistente (N.mm)

P_R Potencia absorbida (W)

$$P_R = M_R \cdot n / 9550$$

F Carga radial para rodamientos radiales, carga axial para rodamientos axiales (N)

D_m Diámetro medio del rodamiento
 $D_m = (d + D) / 2$ (mm)

n Velocidad de rotación (min⁻¹)

μ Coeficiente de rozamiento

Rodamientos sin juntas de estanquidad:

Coefficiente de rozamiento	μ
Rodamiento de bolas de contacto radial	0,0015
Rodamiento de bolas a rótula	0,0010
Rodamiento de bolas de contacto oblicuo	
• de una hilera de bolas	0,0020
• de dos hileras de bolas	0,0024
Rodamiento axial de bolas	0,0013
Rodamiento de rodillos cilíndricos	0,0050
Rodamiento de rodillos cónicos	0,0018
Rodamiento de rodillos a rótula	0,0018

Velocidad de rodamientos

→ Teoría de la norma ISO 15312

La Norma ISO 15312 introduce nuevos conceptos sobre las velocidades de los rodamientos:

- Velocidad de referencia térmica
- Velocidad térmica máxima admisible
- Velocidad límite

■ Velocidad de referencia térmica. Definición

Es la velocidad de rotación del anillo interior para la que se consigue un **equilibrio térmico entre el calor generado por el rozamiento en el rodamiento (N_r) y el flujo térmico emitido a través del asiento (eje y alojamiento) del rodamiento (Φ_r)**. Esto es válido en las condiciones de referencia siguientes.

$$N_r = \Phi_r$$

■ Condiciones de referencia que determinan la generación de calor por rozamiento

Temperatura

- Temperatura del anillo exterior fijo $\theta_r = 70^\circ\text{C}$
- Temperatura ambiente $\theta_{Ar} = 20^\circ\text{C}$

Carga

- Rodamientos radiales: carga radial pura correspondiente al 5 % de la carga radial estática de base.
- Rodamientos axiales de rodillos: carga axial correspondiente al 2 % de la carga axial estática de base.

Lubricante: aceite mineral sin aditivos de extrema presión que tenga, a $\theta_r = 70^\circ\text{C}$, la viscosidad cinemática siguiente:

- Rodamientos radiales: $\nu_r = 12 \text{ mm}^2 / \text{s}$ (ISO VG 32)
- Rodamientos axiales de rodillos: $\nu_r = 24 \text{ mm}^2 / \text{s}$ (ISO VG 68)

Método de lubricación: baño de aceite con un nivel de aceite justo hasta el centro del cuerpo rodante, incluido, en la posición más baja.

Otros

- Dimensiones del rodamiento: hasta un diámetro interior, inclusive, de 1.000 mm
- Juego interno: grupo « N »
- Juntas: rodamiento sin juntas
- Eje de rotación del rodamiento: horizontal
(en los cojinetes axiales de rodillos cilíndricos y los cojinetes axiales de agujas, es conveniente tomar la precaución de alimentar con aceite los elementos rodantes superiores)
- Anillo exterior: fijo
- Regulación de la precarga de un rodamiento de contacto oblicuo: sin juego en funcionamiento

Rozamiento y velocidad de rodamientos

- Calor por rozamiento N_r de un rodamiento que funciona a la velocidad de referencia térmica en las condiciones de referencia:

$$N_r = [(\pi \times n_{\theta r}) / (30 \times 10^3)] \times (M_{0r} + M_{1r})$$

M_{0r} : Momento de rozamiento independiente de la carga

M_{1r} : Momento de rozamiento dependiente de la carga

$$N_r = [(\pi \times n_{\theta r}) / (30 \times 10^3)] \times [10^{-7} \times f_{0r} \times (v_r \times n_{\theta r})^{2/3} \times d_m^3 + f_{1r} \times P_{1r} \times d_m]$$

f_{0r} : Factor de corrección del momento de rozamiento independiente de la carga pero dependiente de la velocidad en las condiciones de referencia (valores informativos en el Anexo A de la Norma)

d_m : Diámetro medio del rodamiento $d_m = 0,5 \times (D + d)$

f_{1r} : Factor de corrección del momento de rozamiento dependiente de la carga

P_{1r} : Carga de referencia

- Condiciones de referencia que determinan la emisión de calor

Área de la superficie de referencia A_r : suma de las superficies de contacto entre los anillos y el eje y el alojamiento, a través de las cuales se emite el flujo térmico.

Flujo térmico de referencia Φ_r : flujo térmico emitido por el rodamiento en funcionamiento y transmitido por conducción térmica a través del área de la superficie de referencia.

Densidad de referencia de flujo térmico q_r : cociente entre el flujo térmico de referencia y el área de la superficie de referencia.

- Flujo térmico emitido a través del asiento

$$\Phi_r = q_r \times A_r$$

- Velocidad térmica máxima admisible. Definición

Un rodamiento en funcionamiento puede alcanzar una velocidad térmica máxima admisible que depende de la velocidad térmica de referencia. La Norma ISO 15312 indica el método para encontrar los valores de esta velocidad.

- Velocidad límite ISO 15312. Definición

La Norma ISO 15312 define la velocidad límite de un rodamiento como aquella a la que los elementos que lo componen ven superada su resistencia mecánica.

→ Teoría de SNR

La gran mayoría de aplicaciones de rodamientos corresponden a condiciones de velocidad alejadas de los valores críticos.

No precisa de cálculos muy precisos, sino que resulta más que suficiente una indicación sobre el límite que no debe superarse. Las definiciones y los métodos de cálculos desarrollados por la Norma ISO 15312 se destinan al uso de los especialistas con herramientas de cálculo potentes, cuando las condiciones de velocidades elevadas hacen ineludible el cálculo.

Es por esto que SNR ha decidido conservar en las tablas de características de los rodamientos el probado concepto de velocidad límite:

■ Velocidad límite de SNR. Definición



Es la velocidad máxima, en condiciones normales de funcionamiento, a la que se considera aceptable el calentamiento interno del rodamiento.

Esta velocidad límite, definida siguiendo los conceptos clásicos, se indica en las tablas de características de los productos diferenciando la utilización con grasa y con aceite.

La velocidad máxima es un indicador clave para el usuario del rodamiento. No obstante, si usted trabaja en una zona de valores próximos a la indicada en nuestras tablas, póngase en contacto con su interlocutor de SNR.

Si lo desea, SNR puede realizarle el cálculo conforme a la norma ISO 15312 para proporcionarle unas informaciones más precisas.

Rozamiento y velocidad de rodamientos

La tabla siguiente, permite comparar la aptitud de los diferentes tipos de rodamientos en cuanto a velocidad.

N.Dm con grasa	Tipos de rodamientos		N.Dm con aceite	
		Rodamientos especiales con lubricación adaptada		Rodamientos especiales
1 100 000		Rodamientos de bolas de alta precisión sin precarga	+ 55%	
650 000		Rodamientos de bolas de alta precisión con precarga ligera	+ 55%	
600 000				Rodamientos estándar
550 000		Rodamientos de una hilera de bolas de contacto radial	+ 25%	
500 000		Rodamientos de bolas a rótula	+ 20%	
450 000		Rodamientos de rodillos cilíndricos	+ 25%	
400 000		Rodamientos de una hilera de bolas de contacto oblicuo	+ 30%	
350 000		Rodamientos de dos hileras de bolas de contacto radial	+ 30%	
		Rodamientos de dos hileras de bolas de contacto oblicuo	+ 40%	
300 000		Rodamientos de rodillos a rótula	+ 35%	
		Rodamientos de rodillos cónicos	+ 35%	
250 000		Rodamientos axiales de rodillos a rótula (únicamente al aceite)	+ 40%	
200 000				
150 000		Rodamientos axiales de bolas		