



Universidad
Carlos III de Madrid

DISEÑO MECÁNICO

RODAMIENTOS

- CRITERIOS DE SELECCIÓN DE UN RODAMIENTO
- PARÁMETROS DE LOS RODAMIENTOS
- ESTIMACIÓN DE LA VIDA ÚTIL

PROCEDIMIENTO DE SELECCIÓN DE UN RODAMIENTO

Procedimiento

Confirmar las condiciones y el ambiente de operación

Seleccionar el tipo de rodamiento y su configuración

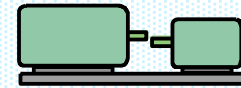
Seleccionar las dimensiones del rodamiento

Seleccionar las tolerancias del rodamiento

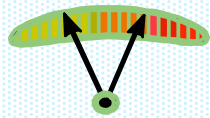
Espacio disponible, montaje



Desalineación



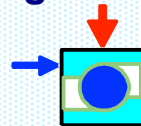
Velocidad (r.p.m.)



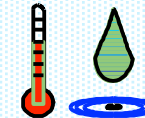
Duración o vida útil

$$L_{10} = \frac{[C]^p}{[P]^p}$$

Carga/Dirección



Condiciones de Funcionamiento



Seleccionar el juego interno del rodamiento

Seleccionar el tipo y material de la jaula

Seleccionar el lubricante, método de lubricación y método de sellado

Seleccionar cualquier especificación especial del rodamiento

Confirmar el procedimiento de manejo

PARÁMETROS DEL RODAMIENTO

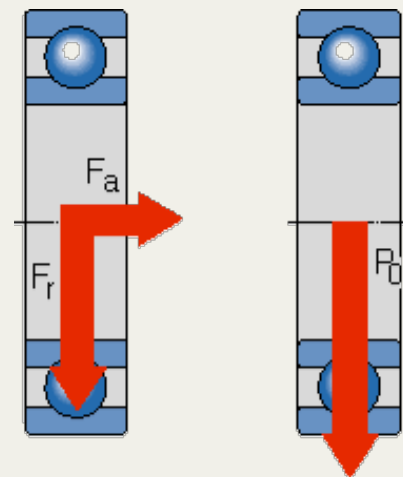
CARGA ESTÁTICA EQUIVALENTE

- $P_0 \rightarrow$ Será una carga estática hipotética resultado de la combinación de la carga axial y radial que actúan sobre el rodamiento.
- Esta carga estática hipotética será radial pura (en rodamientos radiales) o axial centrada (en rodamientos axiales).
- En rodamientos de contacto angular de bolas o de rodillos cónicos se escoge el valor mayor de las siguientes dos expresiones:

$$\begin{cases} P_0 = V \cdot F_r \\ P_0 = X_0 \cdot V \cdot F_r + Y_0 \cdot F_a \end{cases}$$

- En rodamientos de empuje se escoge el valor de la expresión:

$$P_0 = 2,3 \cdot \tan(\alpha) \cdot F_r + F_a$$



$P_0 \rightarrow$ Carga estática equivalente.

$F_a \rightarrow$ Carga axial.

$F_r \rightarrow$ Carga radial.

$\alpha \rightarrow$ Angulo de contacto del rodamiento.

$V \rightarrow$ Factor de rotación.

$X_0 \rightarrow$ Factor estático radial.

$Y_0 \rightarrow$ Factor estático axial.



PARÁMETROS DEL RODAMIENTO

CAPACIDAD ESTÁTICA DE CARGA



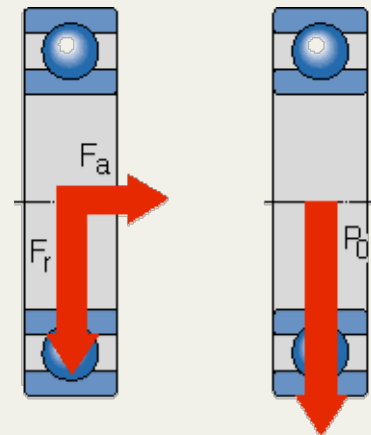
- ❑ $C_0 \rightarrow$ “Expresa la carga necesaria para causar una deformación, en el elemento rodante y en la pista de rodadura, de una diezmilésima (0,0001) del diámetro del elemento rodante en el punto de presión máxima”.
- ❑ No es la carga de rotura ($C_{\text{ROTURA}} > 8 \cdot C_0$) pero a partir de esta carga pueden quedar deformaciones permanentes.
- ❑ Es un estimador de la máxima carga estática admitida por el rodamiento y es el parámetro de referencia para seleccionar el rodamiento cuando se usa a velocidades muy bajas, oscilante, choques, ...
- ❑ En estos casos, se busca un rodamiento que soporte cargas estáticas equivalentes que cumplan: $\rightarrow P_0 = \frac{C_0}{s_0}$
- ❑ $s_0 \rightarrow$ Factor de seguridad estático. $\rightarrow s_0 = \frac{C_0}{P_0}$
- ❑ $s_0 \rightarrow$ Depende de las condiciones de funcionamiento y del tipo de rodamiento. Su valor oscila entre 0,5 y 5, incluso superior.

PARÁMETROS DEL RODAMIENTO

CARGA DINÁMICA EQUIVALENTE

- **P** → Será una carga dinámica hipotética resultado de la combinación de la carga axial y radial **constante** que actúan sobre el rodamiento.
- Esta carga dinámica hipotética será radial pura (en rodamientos radiales) o axial centrada (en rodamientos axiales).
- En rodamientos radiales o de contacto angular se escoge una de las siguientes dos expresiones (para rodamientos de empuje también sirven, con ligeras variaciones):

$$\left\{ \begin{array}{l} P = V \cdot F_r \\ P = X \cdot V \cdot F_r + Y \cdot F_a \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \frac{F_a}{F_r} \leq \xi \cdot \tan \alpha \equiv e \\ \frac{F_a}{F_r} > \xi \cdot \tan \alpha \equiv e \end{array}$$



- P** → Carga dinámica equivalente.
F_a → Carga axial.
F_r → Carga radial.
α → Angulo de contacto del rodamiento.

- V** → Factor de rotación.
X → Factor dinámico radial.
Y → Factor dinámico axial.
ξ → Coeficiente del tipo de rodamiento

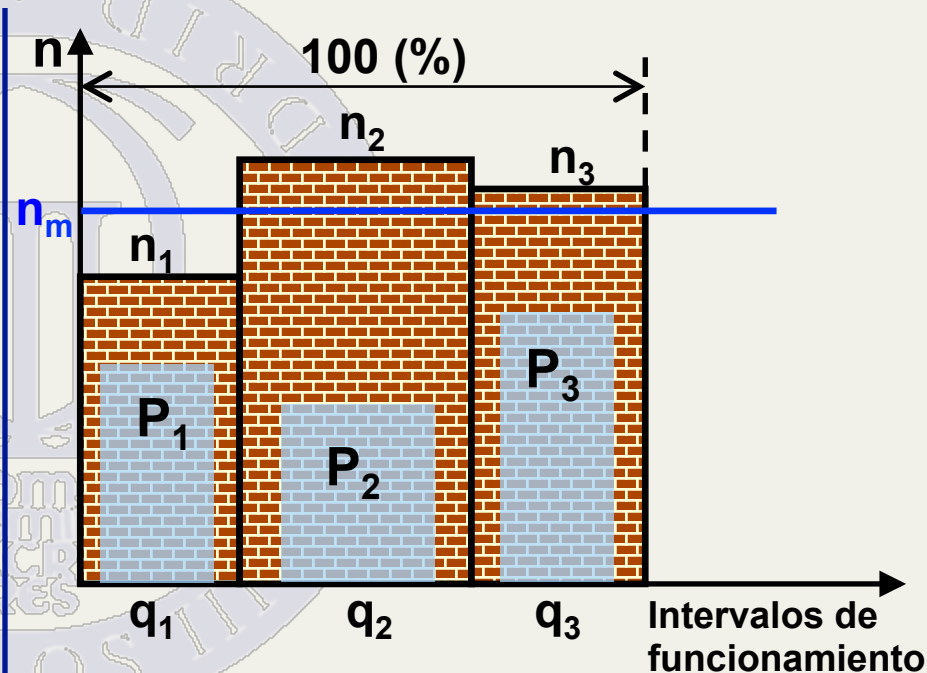
PARÁMETROS DEL RODAMIENTO

CARGA DINÁMICA EQUIVALENTE

- **P** → Carga dinámica hipotética resultado de la combinación de la **carga variable** axial y radial y **velocidad variable** que actúan sobre el rodamiento.

$$P = \sqrt[p]{\frac{\sum \left(\frac{1}{a_i} \cdot q_i \cdot n_i \cdot P_i^p \right)}{\sum (q_i \cdot n_i)}}$$

$$n_m = \frac{\sum (q_i \cdot n_i)}{100}$$



P → Carga dinámica equivalente.

n_m → Velocidad media de giro.

a_i → Coeficiente de duración de vida para cada intervalo de funcionamiento.

p → Exponente del coeficiente de duración de vida ($p=3$ para bola y $p=10/3$ para rodillo).

P_i → Carga dinámica equivalente parcial de cada intervalo de funcionamiento.

q_i → Porcentaje (en %) de duración parcial de cada intervalo de funcionamiento.

n_i → Velocidad de rotación parcial de cada intervalo de funcionamiento.



PARÁMETROS DEL RODAMIENTO

CAPACIDAD DINÁMICA DE CARGA

- ❑ **C** → “Carga máxima que puede soportar un rodamiento en movimiento, sin que aparezcan signos de fatiga en ninguno de sus elementos (aros o elementos rodantes), durante un millón de revoluciones del mismo”.
- ❑ (Experimental) A partir de la capacidad dinámica de carga y de la carga dinámica equivalente de un rodamiento puede hacerse una estimación de la duración o vida nominal del rodamiento:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^p \cdot 10^6 \text{ revoluciones}$$

C → Capacidad dinámica de carga.

P → Carga dinámica equivalente

p → Coeficiente de duración de vida (**p=3** para rodamientos de bolas y **p=10/3** para rodamientos de rodillos).

PARÁMETROS DEL RODAMIENTO

OTROS

- 
- $\frac{C}{P}$ → A la relación entre la capacidad dinámica de carga y la carga dinámica equivalente se le denomina **Seguridad de Carga**.

$$\frac{C}{P} = \frac{f_L}{f_n \cdot f_H}$$

f_L → Factor de esfuerzos dinámicos.

f_n → Factor de seguridad de velocidad.

f_H → Factor de dureza.

- P_u → **Carga Límite de Fatiga** → Si $P < P_u$ no se produce fatiga en el rodamiento.
- **Carga mínima** → La menor carga necesaria que el rodamiento funcione correctamente,
- *Carga mínima* = $0,01 \cdot C$, en los rodamientos de bolas.
 - *Carga mínima* = $0,02 \cdot C$, en en los rodamientos de rodillos.



DURACIÓN O VIDA ÚTIL

VIDA NOMINAL



- ❑ **L** → La duración o vida útil de un rodamiento → Número total de revoluciones (o número de horas operando), en condiciones operativas constantes de velocidad y carga, que está el rodamiento funcionando hasta alcanzar un fallo por fatiga del material.
- ❑ Se ha comprobado que, en condiciones de laboratorio (bien alineado, buena lubricación, sin suciedad, sin humedad y en condiciones acotadas de carga y velocidad) los rodamientos se deterioran por fatiga del material.
- ❑ **L₁₀** → La vida nominal de un rodamiento se basa en un modelo estadístico al 90% y se define como el n° total de revoluciones que el 90% de los rodamientos de un grupo idéntico, sometidos a iguales condiciones operativas de laboratorio, alcanzará o sobrepasará antes de que ocurra el fallo por fatiga del metal.
- ❑ Para rodamientos operando a velocidad constante, la vida nominal (90% de confianza) se expresa como el número total de horas operativas.

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^p \cdot 10^6 \text{ rev.} = \frac{10^6}{60 \cdot n} \cdot \left(\frac{C}{P} \right)^p \text{ horas}$$

n → r.p.m.

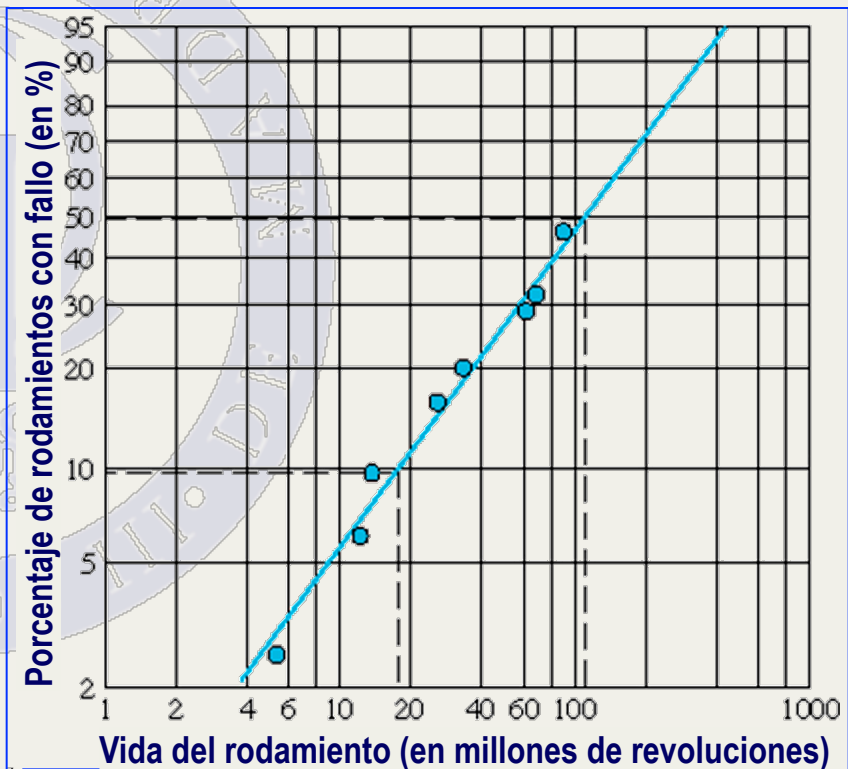
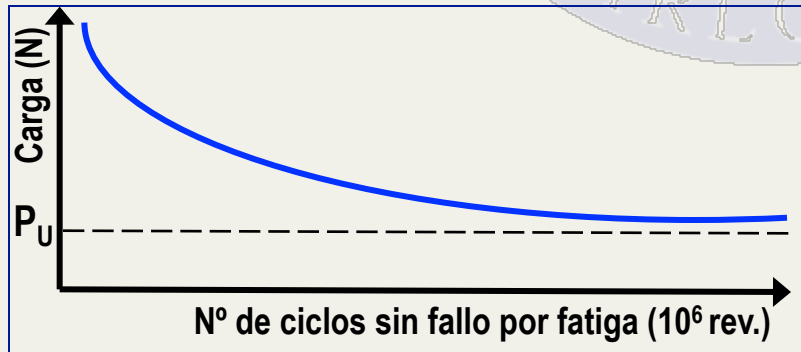
PROBABILIDAD DE SUPERVIVENCIA Y DE FALLO

$$S = \frac{\text{n}^\circ \text{ de rodamientos que superan un determinado n}^\circ \text{ de revoluciones}}{\text{n}^\circ \text{ total de rodamientos de la muestra}}$$

- **S** → Probabilidad de supervivencia de un rodamiento (normalizada). Es el cociente entre el n° de rodamientos que superan un determinado n° de revoluciones sin fallo y el n° total de rodamientos de la muestra.

- **F** → Probabilidad de fallo de un rodamiento (normalizado).

$$F = 1 - S$$





FÓRMULAS PROPUESTAS

❑ Fórmula propuesta por Lundberg y Palmgren:

Probabilidad “S” de que un anillo de un rodamiento sobreviva a una fatiga iniciada debajo de la superficie:

$$\ln \frac{1}{S} = \frac{N^e \cdot \tau_0^c \cdot V}{z_0^h}$$

N Duración a fatiga.

V Volumen sometido a esfuerzos con riesgo de fallo.

τ_0 Tensión cortante ortogonal máxima.

z_0 Profundidad a la que se produce dicha tensión.

e, c, h Exponentes

❑ Fórmula revisada por Ioannides y Harris:

Depende de la pureza del acero, su tratamiento térmico y de la temperatura de funcionamiento del rodamiento

$$\ln \frac{1}{S} = \frac{N^e \cdot (\tau_0 - \tau_u)^c \cdot V}{z_0^h}$$

τ_u Valor umbral de la amplitud de tensión cortante ortogonal antes de producirse un fallo.

VIDA NOMINAL O PROBABILIDAD DE SUPERVIVENCIA DEL 90 %

S → **L**

$$\log \left(\frac{1}{S} \right) = k \cdot F_R^W \cdot L^E$$

S → Probabilidad de Supervivencia.

F_R → Fuerza radial aplicada.

L → Capacidad de vida (en 10⁶ rev.).

k → Constante.

W → Coeficiente establecido.

E → Coeficiente establecido.

S = 0,9 (90%)

L = 1

F_R = C

$$k = \left(\frac{1}{C} \right)^W \cdot \log \left(\frac{1}{0,9} \right)$$

$$\log \left(\frac{1}{S} \right) = \left(\frac{F_R}{C} \right)^W \cdot \log \left(\frac{1}{0,9} \right) \cdot L^E$$

- Esta ecuación se reformula introduciendo una variable **L₁₀** que se denomina **vida nominal o probabilidad de supervivencia del 90 %** (90 % = 100 % - 10 %) y estableciendo que la carga radial sea igual a la carga dinámica equivalente (F_R = P):

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^p \cdot 10^6 \text{ revoluciones}$$

□ **p=3** para rodamientos de bolas

□ **p=10/3** para rodamientos de rodillos



ROCESO DE CÁLCULO DE LA VIDA NOMINAL



1. Selección del tipo y tamaño del rodamiento

- Requisitos técnicos.
- Condiciones operativas.



2. Cálculo de la carga dinámica equivalente que soportará el rodamiento.



3. Determinación final de la vida nominal.

-
- La estimación de la vida nominal puede ser mejorada considerando factores operativos, técnicos o de fiabilidad:



- Vida nominal ajustada (ISO 281).
- Vida nominal ajustada ampliada (ISO 281).





VIDA NOMINAL AJUSTADA

- Estimación de la vida útil de rodamientos contemplando diferentes materiales, diversas condiciones operativas y probabilidades de supervivencia del (100-x)%.

$$L_{na} = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot \left(\frac{C}{P} \right)^p \cdot 10^6 = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot L_{10}$$

a_1 → Factor de ajuste de vida por fiabilidad.

FIABILIDAD	90%	95%	96%	97%	98%	99%
Factor de ajuste a_1	1	0,62	0,53	0,44	0,33	0,21

a_2 → Factor de ajuste de vida por material (para acero de rodamientos, **$a_2 = 1$**).

a_3 → Factor de ajuste de vida por condiciones operativas.

VIDA NOMINAL AJUSTADA

■ A nivel práctico

$$a_{23} = a_2 \cdot a_3 \approx a_3$$

$$L_{na} = a_1 \cdot a_{23} \cdot L_{10}$$

a_3 → Se determina a partir de la lubricación (limpieza y relación de viscosidades K).

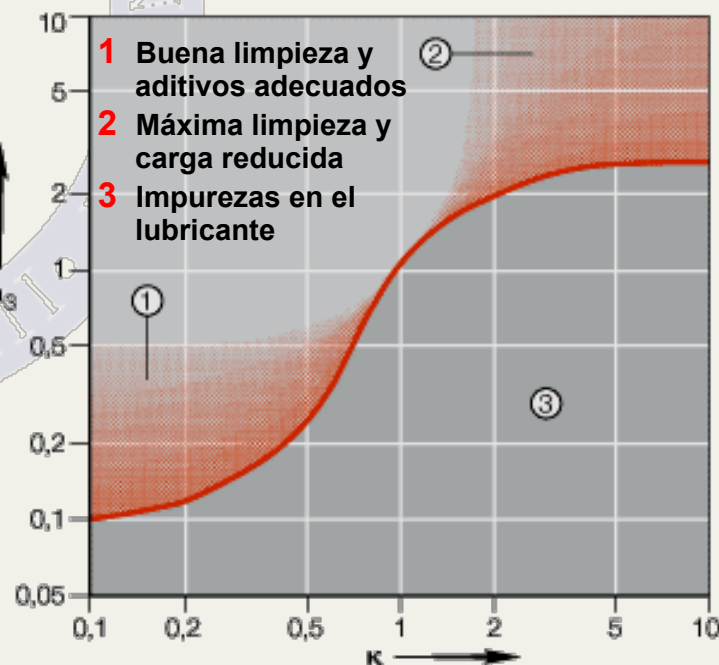
$$K = \frac{\nu}{\nu_1}$$

ν → Viscosidad real del lubricante

ν_1 → Viscosidad necesaria para una lubricación adecuada.

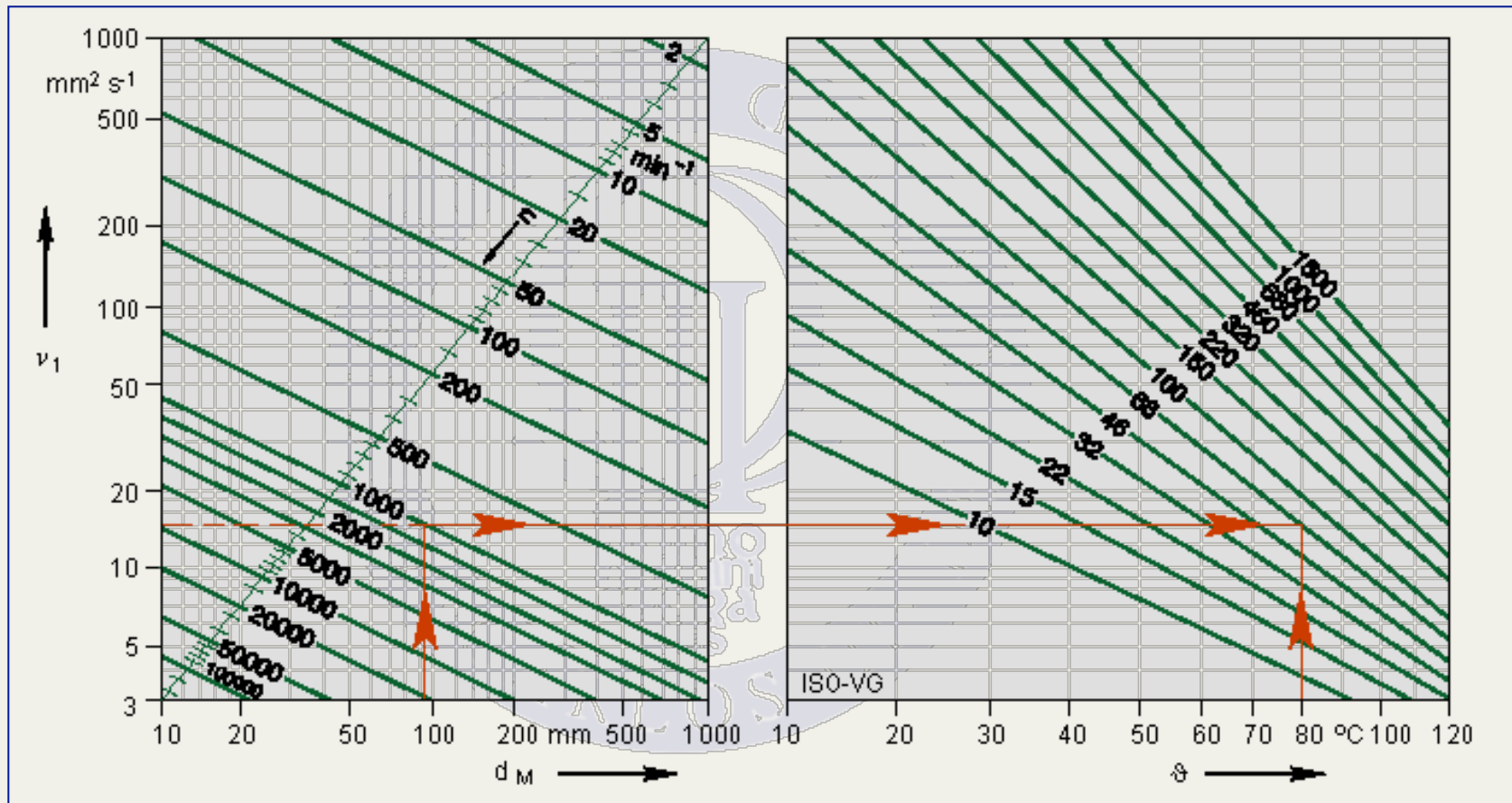
$$\nu_1 = f(d_m, n, T)$$

- Diámetro medio del rodamiento.
- Velocidad de giro.
- Temperatura de funcionamiento.





CÁLCULO DE LA VISCOSIDAD NOMINAL “ v_1 ”



- Diámetro medio del rodamiento.
- Velocidad de giro.
- Temperatura de funcionamiento.

CÁLCULO DE LA RELACIÓN DE VISCOSIDADES “ K ”

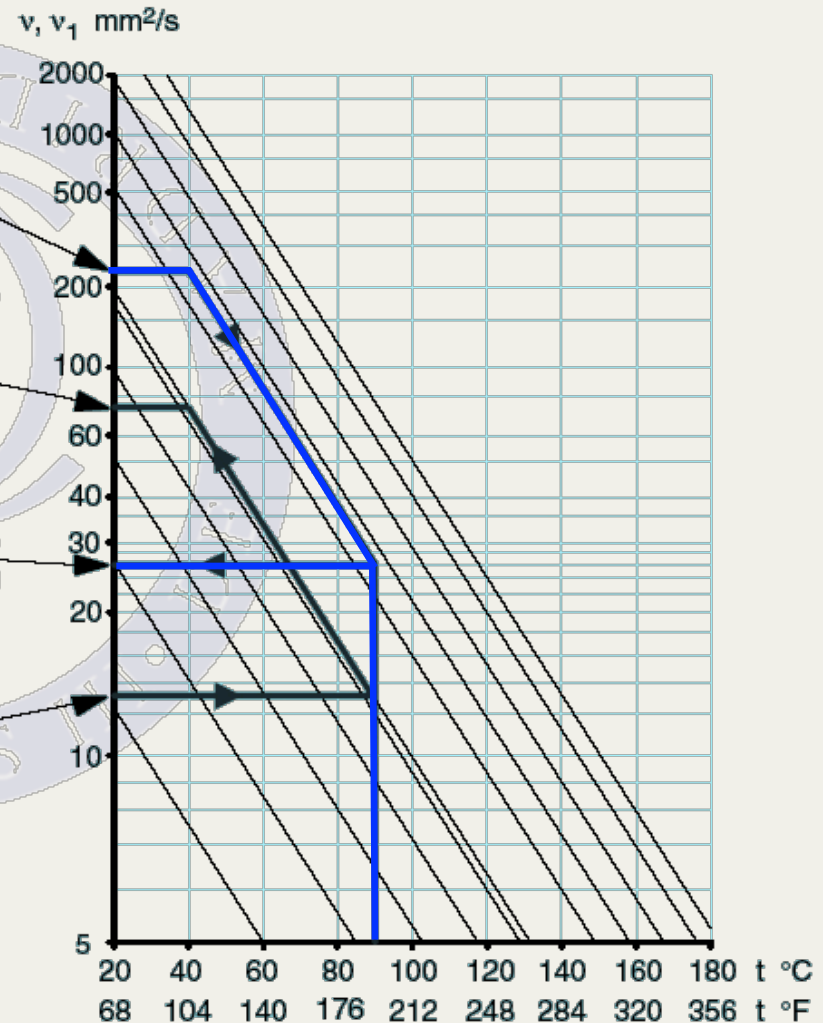
3. El aceite ISO VG 220 tiene una viscosidad de 220 mm²/s a la temperatura de referencia 40 °C

2. Viscosidad del aceite requerida a la temperatura de referencia de 40 °C es 70 mm²/s

4. Viscosidad real del aceite trabajando a la temperatura de operación 90 °C, $v = 26$ mm²/s

1. Viscosidad del aceite requerida a la temperatura de operación 90 °C, $v_1 = 13$ mm²/s

5. $K = v / v_1 = 26 / 13 = 2,0$ para este ejemplo





VIDA NOMINAL AJUSTADA AMPLIADA

- Admitida por la ISO 281 y recomendada por los fabricantes:

$$L_{naa} = a_1 \cdot a_{vc} \cdot L_{10}$$

a_{vc} → Factor de ajuste dependiente de las condiciones operativas, por material y considerando la carga límite a fatiga.

$$K = \frac{v}{v_1}$$

$$\eta_c \cdot \frac{P_u}{P}$$

Gráfica

a_{vc}

$$a_{vc} = f \left(K, \eta_c \frac{P_u}{P}, \text{tipo de rodamiento} \right)$$

Cada tipo de rodamiento tiene su gráfica característica

P → Carga Dinámica Equivalente

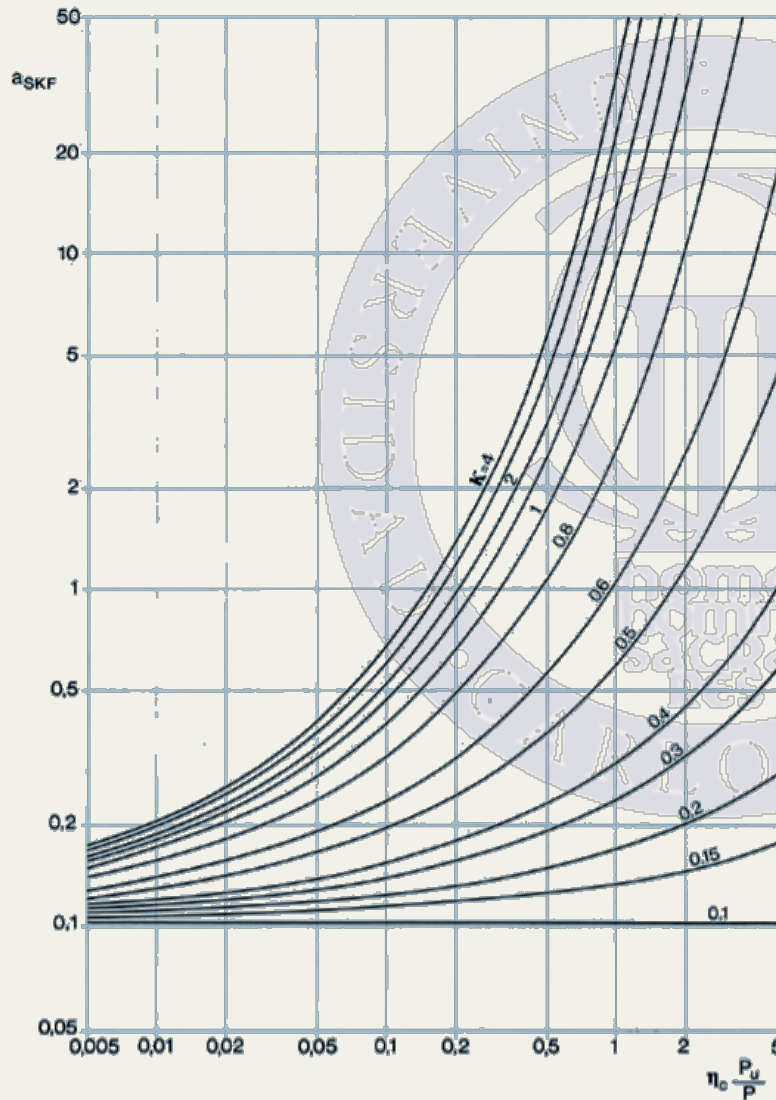
P_u → Carga Límite a Fatiga

η_c → Coeficiente de influencia de la suciedad ambiental

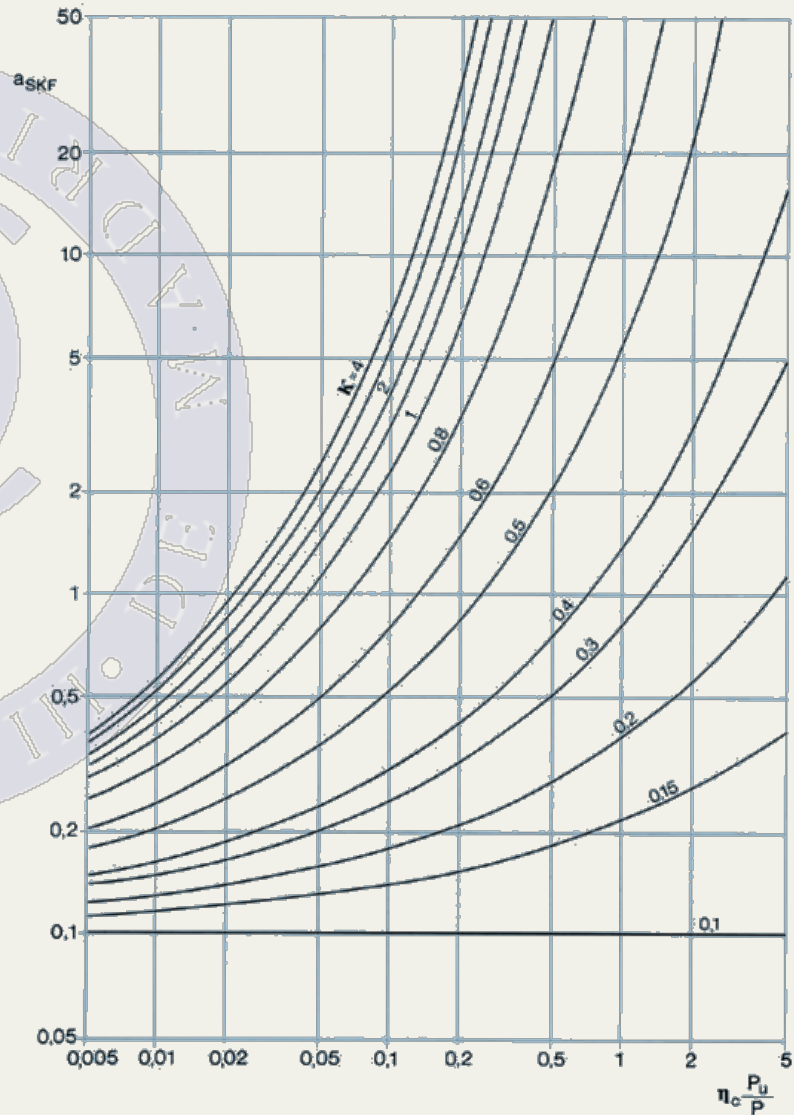


VIDA NOMINAL AJUSTADA AMPLIADA

Factor a_{SKF} para rodamientos radiales de rodillos.



Factor a_{SKF} para rodamientos radiales de bolas.





VIDA NOMINAL AJUSTADA AMPLIADA

<i>Suciedad ambiental</i>	<i>Coeficiente η_c</i>
Máxima limpieza. Tamaño de las partículas del orden del espesor de la película de lubricante. Condiciones de laboratorio.	1
Limpieza elevada. Aceite lubricante con filtración muy fina. Rodamientos engrasados y obturados.	0,8
Limpieza normal. Aceite lubricante con filtración fina.	0,5
Suciedad ligera. Ligera suciedad en el aceites lubricante.	0,5 hasta 0,3
Suciedad típica. Rodamiento contaminado, con abrasión de otros elementos.	0,3 hasta 0,1
Suciedad fuerte. Entorno de los rodamientos muy sucio. Rodaduras insuficientemente obturadas.	0,1 hasta 0
Suciedad muy fuerte.	0

CÁLCULO DE LA VIDA NOMINAL DEL RODAMIENTO

DATOS DE PARTIDA

- Diámetro del eje.
- Tipo de rodamiento.
- Cargas radiales y axiales sobre el rodamiento.
 - Estáticas.
 - Dinámicas.
- Velocidades de giro.
- Capacidad de carga (catálogo).
 - Estáticas.
 - Dinámicas.
- Condiciones de servicio.
 - Temperatura operativa.
 - Condiciones ambientales (suciedad, humedad, ...).
- Lubricación.
 - Lubricante empleado.
 - Sistema de lubricación.

INCOGNITAS

- Tipo de rodamiento.
- Rodamiento individual (serie, modelo, ...).
- Capacidad de carga (catálogo).
 - Estáticas.
 - Dinámicas.
- Lubricación.
 - Lubricante empleado.
 - Sistema de lubricación.
 - Sistema de estanqueidad.
- Ubicación en el eje o árbol.
- Velocidad máxima.
- Estimación de vida.
 - Vida nominal.
 - Vida nominal ajustada.
 - Vida nominal ajustada ampliada.



CÁLCULO DE LA VIDA NOMINAL DEL RODAMIENTO

1. Cálculo del factor de velocidad f_n (dependiente de la velocidad de giro) → Tabulado en los catálogos.
2. Cálculo del factor de esfuerzos dinámicos f_L (depende del rodamiento usado) → Tabulado en los catálogos.
3. Determinación de la carga dinámica equivalente P .
(X, Y, V) → para cada rodamiento → catálogo

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

4. Cálculo de la capacidad dinámica de carga (para ese caso). Debe ser menor que la C teórica del catálogo.

$$C = \frac{f_L}{f_n} \cdot P$$

6. Comprobación de la resistencia bajo fatiga.
Determinación de la carga dinámica equivalente P_0 .

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

(X_0, Y_0) → para cada rodamiento → catálogo.

CÁLCULO DE LA VIDA NOMINAL DEL RODAMIENTO

Cálculo de la capacidad estática de carga para ese caso.

$$C_0 = f_s \cdot P_0$$

Debe ser menor que la C_0 teórica del catálogo.

Factor de seguridad estático f_s o $s_0 \rightarrow$ catálogo.

$f_s = 1,2 - 2,5$ para exigencias elevadas.

$f_s = 0,8 - 1,2$ para exigencias normales.

$f_s = 0,5 - 0,8$ para exigencias reducidas.

6. Cálculo de la vida nominal del rodamiento.

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^p \cdot 10^6 \text{ rev.} = \frac{10^6}{60 \cdot n} \cdot \left(\frac{C}{P} \right)^p \text{ horas}$$

$n \rightarrow \text{r.p.m.}$

8. Cálculo de la vida nominal ajustada.

$$L_{na} = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot L_{10} = a_1 \cdot a_{23} \cdot L_{10}$$

9. Cálculo de la vida nominal ajustada ampliada.

$$L_{naa} = a_1 \cdot a_{vc} \cdot L_{10}$$