

Tema 5. Cojinetes de Deslizamiento.

Objetivos.

Analizar, diseñar y seleccionar un cojinete de casquillo, tomando en cuenta los diferentes factores que intervienen en la lubricación, como viscosidad, temperatura, espesor de la película, excentricidad del eje y presión máxima de la película de aceite.

Contenidos:

Introducción. Clasificación. Materiales. Selección de lubricantes y sistema de lubricación. Diseño de cojinetes de deslizamiento radiales.

Cantidad de horas del tema: 5

Cantidad de horas de clases: 3

Evaluación: Prueba parcial. 1 hora

Bibliografía.

- Mott, R. L. Machine Elements in Mechanical Design. Editorial Prentice. 1999.
- Dobrovolski. Elementos de Máquinas. Editorial MIR. 1981.
- Reshetov. Elementos de Máquinas. Editorial Pueblo y Educación. 1985.
- Norton. Diseño de Máquinas. Editorial Prentice Hall. 1999
- ♦ Fuller D. Teory and Practice of Lubrication for Engineers, Mc Graw-Hill, N. York, 1984.
- ♦ García F. Lubricación y Lubricantes, Empresa Nacional de producciones del MES, C.Habana, 1986.
- ♦ Orlov, Ingeniería de Diseño, Editorial MIR, Moscú, 1985.
- ♦ Shigley, Diseño en Ingeniería Mecánica, Mc Graw-Hill, México, 1989.
- ♦ DIN 31652. Plain Bearing, Hidrodinamic Plain Journal Bearing Designed for Operation Under Steady State Conditions. Parts 1,2,3, 1983.

1. Introducción

Desde la antigüedad el hombre se ha preocupado por la pérdida de potencia en las máquinas y el desgaste de las piezas en movimiento relativo. Pero aún hoy, en la actualidad, la investigación de estos fenómenos por su complejidad multifactorial tiene gran vigencia.

En nuestro curso será abordado el estudio de los cojinetes de deslizamiento o de contacto plano, como elementos de máquinas que se emplean para guiar árboles y ejes, permitiendo que giren las piezas libremente y soportando las cargas que actúan sobre éstos.

A diferencia de los cojinetes de rodadura, que trabajan con fricción por rodadura, los cojinetes de contacto plano trabajan con fricción por deslizamiento. Por eso las pérdidas por fricción para los cojinetes de deslizamiento, que trabajan con frecuentes arranques y paradas o en régimen de lubricación límite o semi-límite, son mayores que las de los rodamientos.

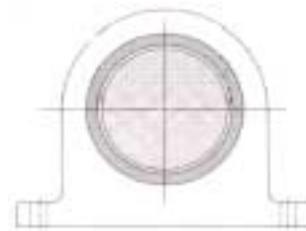
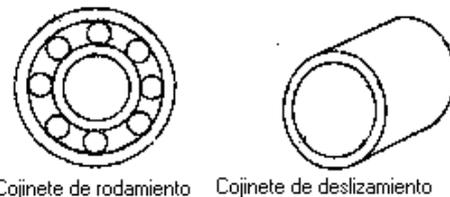


Fig. - Cojinete de deslizamiento en su chumacera.



No obstante el inconveniente asociado con las pérdidas por rozamiento, el campo de aplicación de los cojinetes de deslizamiento es amplio. Ellos pueden ser empleados:

- o Para guiar árboles con elevada precisión;
- o En máquinas con vibraciones, fuertes sacudidas o golpes, como las prensas;
- o Para trabajar en medios agresivos, por ejemplo el agua salada.
- o Donde no puedan existir elementos contaminantes, como la industria farmacéutica o la industria de alimentos;
- o En apoyos de árboles acodados, ej. los cigüeñales;
- o En árboles rápidos, ya que la vida útil de estos cojinetes no depende totalmente del número de ciclos de carga;
- o En árboles extrapesados, donde colocar un rodamiento sería caro, ya que debe fabricarse a pedido;
- o Para mecanismos de marcha lenta y poca responsabilidad
- o En montajes con dimensiones diametrales muy pequeñas.

Debe ser señalado que, con relación a los rodamientos, los cojinetes de deslizamiento necesitan mayores dimensiones longitudinales para lograr capacidades de carga semejantes. Además los cojinetes de deslizamiento presentan aumentos progresivos de las holguras debido al desgaste por lo que requieren de un cuidadoso diseño y en ocasiones de complejos sistemas de lubricación, para garantizar un correcto funcionamiento.

Los cojinetes de rodadura posiblemente sean las piezas mas normalizadas a escala internacional, lo que no ocurre con los cojinetes de deslizamiento, que por su sencillez pueden no ser fabricados de forma centralizada, sin embargo en el mundo existen firmas dedicadas a la construcción y comercialización de cojinetes lisos. Muchos de los fabricantes prestigiosos de rodamientos se dedican también a la construcción y venta de cojinetes planos, ya sean enterizos, ranurados, partidos o de configuraciones complejas, hechos de materiales apropiados para los más variados usos, como la industria automotriz, las construcciones navales, los ferrocarriles, los equipos electrodomésticos, médicos y de la construcción o de la industria en general.

Los cojinetes de deslizamiento pueden clasificarse para su estudio, atendiendo a diferentes criterios: dirección de las cargas, condiciones de lubricación, forma, relación longitud-diámetro y tipo de rozamiento, entre otros aspectos. A continuación le presentamos los dos criterios de clasificación fundamentales:

*Según la dirección en que soportan las cargas:

- Radiales
- Axiales
- Radio-axiales

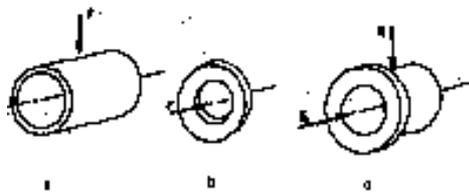


Fig. 2 Tipos de cojinetes según la dirección de la carga que soportan: a) Radial, b) Axial c) Radio-axial

*Según las condiciones de lubricación que se establecen durante su funcionamiento:

- Hidrodinámica. Las superficies del cojinete y el árbol están separadas totalmente por una cuña de lubricante que se forma debido al movimiento relativo entre ambas superficies, y depende de las características del movimiento, de la magnitud y dirección de la carga en el cojinete y de las propiedades del lubricante empleado.
- Hidrostática Se logra la separación de las superficies garantizando un suministro lubricante a presión en la zona de contacto.
- Límite. Se produce el contacto entre las crestas superficies del cojinete y el muñón en la zona de contacto.

Para comprender mejor el tipo de lubricación que puede establecerse en el cojinete, nos referiremos a la curva de *Stribeck*, mostrada en la siguiente figura.

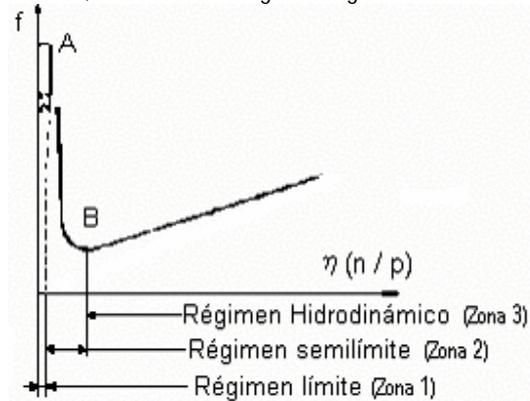


Fig. 3 Curva de Stribeck.

En el gráfico aparece la dependencia entre el coeficiente de fricción f y el parámetro de Stribeck $\eta (n / p)$.

Siendo:

η : La viscosidad dinámica o absoluta del aceite que se emplea como lubricante.

p : La carga por unidad de área proyectada.

n : la frecuencia de rotación de la superficie en movimiento.

Zona 1 -. Lubricación en régimen límite. El coeficiente de fricción es alto, no varía con el cambio del parámetro de *Stribeck*, este depende de las propiedades de las superficies que se encuentren en contacto y del lubricante presente, excepto la viscosidad.

Zona 2 -. Definida entre los puntos A y B, Tiene mayor espesor la película de lubricante, que en la zona 1, sin embargo se mantienen en contacto las crestas de las microirregularidades superficiales. En estas condiciones, se establece el régimen llamado semi-límite, el coeficiente de fricción disminuye al igual que la temperatura en la medida que se exista mayor cantidad de lubricante entre las superficies.

Zona 3 -. Lubricación en régimen hidrodinámico. En el punto B la capa de lubricante tiene el mínimo espesor posible para que no se toquen las crestas, y en estas condiciones se logra que el coeficiente de fricción sea mínimo. Para elevados valores del parámetro de *Stribeck*, que propician espesores de capa mayores, se producen aumentos del coeficiente de fricción, ya que además existe rozamiento entre las capas de lubricantes.

2. Lubricantes.

La función de los lubricantes es disminuir las pérdidas por rozamiento y el desgaste de las superficies de los elementos en movimiento que componen el cojinete. El lubricante es también importante para disipar el calor que se produce durante el funcionamiento, trasladar los productos del desgaste, y proteger las piezas contra la corrosión. Los lubricantes más conocidos son los aceites y las grasas.

Los aceites son lubricantes líquidos, que sustituyen el rozamiento exterior de los cuerpos sólidos por el rozamiento entre las capas interiores del fluido y son capaces de evacuar grandes cantidades de calor. Comúnmente se emplean aceites derivados del petróleo, aunque para la lubricación de los cojinetes pueden emplearse otros líquidos en los cuales es necesario que trabaje el cojinete, como el agua salada en los timones de las embarcaciones. En ese caso el árbol y el cojinete deben fabricarse de un material adecuado al medio, árboles de acero inoxidable y cojinetes de madera o caucho.

En los casos de cojinetes que trabajan en lubricación hidrodinámica es importante dedicar gran atención a la viscosidad, propiedad que indica el rozamiento interior de los líquidos, es decir la resistencia al desplazamiento relativo de las capas del fluido. Características propias de los lubricantes también son: temperatura de inflamación, temperatura de congelación, untuosidad etc.

Para reducir la dependencia de la viscosidad con la temperatura, aumentar la resistencia de la película de aceite o mejorar otra de las cualidades de los lubricantes se emplean los aditivos. Los aditivos son compuestos químicos cuya función es mejorar las propiedades naturales de los lubricantes, estos pueden ser aceites de origen animal o vegetal, compuestos sulfurosos, de cloro o flúor. Entre las funciones atribuidas a los aditivos deben ser señaladas su acción como limitadores del deterioro del lubricante a causa de fenómenos químicos ocasionados por las condiciones del entorno o su actividad, la protección de la superficie lubricada contra la agresión de contaminantes y mejorar las propiedades físico químicas del lubricante.

Los aditivos pueden ser clasificados en:

- . Aditivos que actúan sobre las propiedades físicas.
- . Aditivos que actúan sobre las propiedades químicas.
- . Aditivos que modifican propiedades físico-químicas.

Entre los aditivos que actúan sobre las propiedades físicas de los lubricantes tenemos, los que mejoran el índice de viscosidad (polisobutenos, copolímeros de acrilato metacrilato) y los depresores del punto de congelación (polímeros, copolímeros de acrilato metacrilato, poliacrilamidas).

Para mejorar las propiedades químicas se emplean los antioxidantes (dialifosfatos de zinc, fenoles bloqueados), anticorrosivos (dialifosfatos de zinc, ditiocarbonatos metálicos) y antiherrumbre (sulfonitos, aminos, ácidos grasos, sulfonatos).

Los aditivos que modifican las propiedades físico químicas son: detergentes (jabones de ácidos, grasas superiores, sulfonatos), dispersantes (copolímeros amida epóxica, inida ésteres-fosfórico, polímeros hidrocarbonatados), aditivos de extrema presión (azufre, cloro y fósforo), de untuosidad (ácidos animales y vegetales), además antiespumantes y emulgentes.

Otro lubricante muy empleado es la grasa, que se clasifica como semisólido o plástico. Se obtiene a partir de aceites derivados del petróleo con la adición de espesantes. Tiene la ventaja de que los conjuntos en rozamiento, mantienen capas de lubricantes relativamente gruesas en superficies verticales, son comúnmente usados en conjuntos de difícil acceso para la relubricación, que requieren sellaje, y en cojinetes abiertos, poseen buena resistencia a la humedad. Se emplean en el 95% de las máquinas eléctricas, y comúnmente trabajan a temperaturas menores que 80°C.

También son bastante conocidos los lubricantes sólidos como el disulfuro de molibdeno y el grafito coloidal. Trabajan satisfactoriamente en condiciones de temperaturas muy bajas o muy altas, en vacío, ambientes químicamente activos, o limpios, y para pequeños movimientos.

3. Materiales

Los materiales para cojinetes deben ser seleccionados atendiendo a las condiciones de trabajo, el tipo de lubricación, el lubricante que emplea y los materiales del árbol que se apoya en él. Los árboles por lo general son más caros y complejos de elaborar, como es el caso del cigüeñal, y por eso se fabrican de materiales más resistentes que los cojinetes.

Los árboles y ejes, para garantizar un buen funcionamiento del cojinete, deben tener alta dureza y buen acabado superficial. Los aceros de medio carbono, con un adecuado tratamiento térmico, garantizan esas propiedades y son muy usados en la construcción de árboles y ejes (pueden tener una dureza de 40 a 50 HRC). Para algunas aplicaciones puede emplearse hierro fundido de alta resistencia. Cuando se necesitan árboles del menor diámetro posible, pueden emplearse aceros aleados, que con tratamiento térmico o termoquímico, puede alcanzar una dureza superficial de 55 a 60 HRC.

Para completar el par de fricción, proporcionando buenas condiciones de trabajo el material del cojinete debe cumplir con la mayoría de las siguientes condiciones:

- Elevado poder antifricción (Bajo coeficiente de rozamiento en el material del muñón para evitar grandes pérdidas de potencia y elevación de temperatura en el cojinete).
- Alta resistencia al desgaste.
- Alta resistencia a la fatiga.
- Buena adaptabilidad funcional (esto permite reducir las presiones locales debido a las deformaciones elásticas y errores de fabricación).
- Alta conductividad térmica (posibilita la disipación de mayor cantidad de calor al exterior del cojinete).
- Bajo coeficiente de dilatación térmica (garantiza menores variaciones de las holguras durante el funcionamiento).
- Bajo módulo de elasticidad.
- Buena maquinabilidad.
- Capacidad de fundirse con facilidad.
- Alta resistencia a la corrosión.
- Capacidad de formar y restituir películas de lubricante en su superficie.

Además es muy importante tener en cuenta el costo del cojinete que comprende fundamentalmente dos aspectos, los gastos en la fabricación del elemento y los del material.

Materiales mas empleados en la construcción de cojinetes:

Bronce:

Aleación de cobre, que puede contener como elementos aleantes el estaño, el plomo, y en pequeñas cantidades el fósforo y níquel. Es típico en para los cojinetes de deslizamiento una aleación de un 12÷15% de estaño en caso de aplicaciones con presiones y velocidades medias. En aplicaciones de altas presiones a velocidades medias es usual el empleo de una aleación de plomo (bronce al plomo).

Las propiedades fundamentales del bronce son:

- . Alta resistencia a la fatiga.
- . Punto de fusión relativamente alto.
- . Mayor dureza que los babbitt y menor adaptabilidad funcional.
- . Requieren buena lubricación.

Sus pocas posibilidades de adaptación funcional, en comparación con otros materiales para cojinetes, hacen que sea peligrosa la aparición de partículas de desgaste duras en el lubricante que pueden provocar desgaste adhesivo. Pueden fabricarse casquillos de bronce al estaño, para cargas altas y velocidades medias, o al bronce se le puede adicionar plomo para disminuir el desgaste en los árboles, aunque esto hace a la aleación menos resistente a la corrosión.

También son usados cojinetes de bronce sinterizados y autolubricados impregnados en aceite, con un 20 o 30% de aceite. Estos materiales hacen al cojinete silencioso, fiable y con pocos requerimientos de mantenimiento, pero a su vez son extremadamente frágiles.

Ejemplos de bronce:

SAE 797 (80% Cu, 10% Pb, 10% Sn)
SAE 799
SAE 48,

Según la norma GOST-R:

Br OF 6.5-0.15 (6-7% Sn, 0.1-0.15% P)
Br OS 10-10 (9-11% Sn, 9-11% Pb)
BOTsS3-12-5 (2-4/ Sn, 11-13/ Zn, 4-6/ Pb)

Aleaciones de cobre estaño y plomo (Sn 1.5%, Pb 22%, Cu el resto) son empleadas en la actualidad como recubrimientos de los casquillos de acero en los cojinetes. Estas capas pueden ser posteriormente cubiertas por aleaciones de estaño y plomo con un bajo porcentaje de cobre (Sn 10%, Cu 2%, Pb el resto ó Sn 10%, Cu 5%, Pb el resto), para conferirle las virtudes del metal blanco. Sobre el casquillo de acero laminado se deposita por fundición la capa de aleación Pb-Sn-Cu, con una barrera de níquel depositada por electrodeposición, al igual que la capa de deslizamiento Pb-Sn-Cu, y la protección de aleación Pb-Sn. Estas aleaciones tiene buena conductividad térmica, buena capacidad de carga (18MPa) con velocidades máximas de aplicación del orden de 12m/s. Deben emplearse con eje de durezas superiores a 250 HB y en condiciones de lubricación hidrodinámicas.

Babbitt:

Aleaciones con base estaño y plomo, también llamadas metal blanco. Se emplean como revestimiento debido a su poca rigidez.

Propiedades:

- . Baja dureza.
- . Gran plasticidad.
- . Buena susceptibilidad funcional.
- . Baja resistencia a la fatiga.
- . Bajo punto de fusión.
- . Buena conductividad térmica
- . Buena capacidad para retener películas de lubricantes.

Se considera el babbitt B83 (GOST), que contiene 81-84 % de estaño, 11% de antimonio, 6% de cobre, un excelente metal antifricción y resistente a las cargas de choque. Las partículas de desecho de los cojinetes de babbitt son blandas.

Para lograr buena resistencia a la compresión en cojinetes de babbitt es necesario disminuir el espesor de la capa depositada, por ejemplo para babbitt base estaño la resistencia a la compresión en cojinetes con un capa de 0.5 mm de espesor es de 8.3 MPa y para 0.1 mm de 29.4 MPa. En cojinetes para motores se recomiendan espesores de 0.25 a 0.4 mm para babbitt con base plomo o estaño.

Ejemplo:

GOST B89 (88-90% Sn, 7-8% Sb, 2.5-3.5% Cu, <0.3% Pb)
GOST B16 (15-17% Sn, 15-17% Sb, 1.5-2% Cu, 64-68% Pb)

[SAE 12] (3.5% Cu, 7.5% Sb 89% Sn)

[SAE 13] (0.5% Cu, 83,5% Pb, 10 Sb, 6% Sn)

Aleaciones de aluminio:

Pueden emplearse como elementos de aleación, estaño, níquel, cobre, silicio y cadmio. Requiere de árboles extremadamente pulidos.

Propiedades:

- . Alta resistencia a la fatiga.
- . Alto coeficiente de expansión térmica (Debe trabajar a $t < 150^{\circ}\text{C}$).
- . Alta conductividad térmica.

Ejemplo:

[SAE 770] (92% Al, 1% Cu, 6% Sn, 1% Ni).

Las aleaciones de aluminio con cinc y magnesio tienen aplicación en la industria automotriz donde hay altas cargas y velocidades. Aleados con manganeso, níquel, cromo, antimonio, son de propiedades semejantes al babbitt.

El aluminio con 6,5% estaño, níquel, silicio y cobre es apropiado para altas velocidades y cargas, pueden servir como recubrimiento o como pieza entera.

Aleaciones de aluminio pueden emplearse como recubrimientos, ejemplo: Al Sn Cu (Estaño 17.5-22.5%, Cobre 0.7-1.5% y el resto de Aluminio). Esta aleación se lamina sobre un casquillo de acero, con una capa intermedia de aluminio puro para aumentar la adherencia de ésta al acero, puede alcanzar capacidades de carga 80% mayores que los cojinetes con recubrimientos de metal blanco, presenta también mayor resistencia a la fatiga, aunque no tan influenciada por el espesor de la capa antifricción y la temperatura como en aquellas. Su incrustabilidad y conformabilidad son adecuadas aunque menores que las del metal blanco. El acabado superficial puede ser de hasta $0.4\mu\text{m}$, semejante a las del metal rosado.

Hierro fundido:

Se emplean en cojinetes lentos (1 a 2 m/s) y poco cargados, los árboles deben tener una dureza superior a los cojinetes y buen acabado superficial, deben trabajar con lubricación abundante. En este material, las inclusiones de grafito le proporcionan un lubricante complementario.

Propiedades:

- Poca adaptación funcional.
- Alta dureza superficial.
- Alta fragilidad (poca resistencia a cargas de choque).

Ejemplos:

GOST FGA-1 (3.2-3.6% C, 1.6-2.4% Si, 0.6-0.9% Mn, 0.2-0.35% Cr, 0.2-0.4% Ni, <0.7% Cu, 0.15-0.2% P, < 0.12% S)

GOST FARA-1 (2.8-3.5% C, 1.8-2.5% Si, 0.5-1.2% Mn, 0.3-0.7% Cu, 0.2% P, 0.03% S)

GOST FMA-1 (2.6% C, 0.8% Si, 0.3% Mn, 0.6% Cr, 0.2% P, 0.03% S)

GOST FC-1.3 (2.8-3.6% C, 0.5-1.1% Si, 0.6-1.2% Mn, 0.150% Cr, 0.2% Cu, 0.2% P, 0.1% S)

Los materiales basados en mezclas de carbono y grafito presentan buenas propiedades autolubricantes, son químicamente y dimensionalmente estables, y de alta resistencia al desgaste, se emplean en condiciones difíciles de lubricar o limpias. Son frágiles y soportan altas temperaturas. Ejemplos: HY22, HY49 (marcas comerciales)

Materiales no metálicos:

Estos tipos de materiales se emplean por su buena adaptabilidad. Los desechos del desgaste son blandos, tienen la posibilidad de ser lubricados con una gran diversidad de fluidos, no tienen afinidad química con los materiales de los árboles, en muchas ocasiones tienen pequeño módulo de elasticidad, y su termoconductividad es baja.

Entre los materiales no metálicos puede ser mencionado el teflón (politetrafluoretileno), cuyas principales características son:

- Bajo coeficiente de dilatación térmica.
- Poca desgaste.
- Bajo coeficiente de fricción.
- Amplia gama de temperaturas de servicio (-200 a 280°C).
- No reacciona con agentes químicos ni con el agua.

Los materiales no plásticos se puede usar en cojinetes enterizos de poco tamaño, con bajas presiones o en capas delgadas como revestimiento de casquillos metálicos, en este caso mantiene las buenas propiedades antifricción, logra un aumento de la capacidad de carga, y el respaldo le facilita la unión por interferencia al alojamiento. Puede usarse con una capa de bronce entre el acero y el teflón, lo que le proporciona buena conductividad térmica al cojinete.

Se trabaja también con resinas termoestables, por ejemplo: A11, amianto impregnado con resina fenólica (alta resistencia a la compresión). Estos materiales son empleados en cojinetes aplicados en cojinetes de grúas, transportadores y en los sistemas de dirección de vehículos. Puede adicionársele grafito, para mejorar sus propiedades antifricción.

La A19 es una resina termoestable con lana de amianto en forma de paño presenta estabilidad dimensional a altas temperaturas.

También se fabrican cojinetes, con resina fenólica y paño de algodón, que poseen alta resistencia a la compresión, y a la abrasión, pueden lubricarse con aceite, grasa agua o sin lubricar, Ejemplo: CL47 (nombre comercial).

El material conocido en el mercado como WA82, hecho de resina cresílica con hilo de amianto que se arrolla como una bobina, para cojinetes de gran diámetro, tiene buena estabilidad dimensional frente al agua, baja resistencia a la compresión, puede absorber las partículas de residuo protegiendo la otra superficie en contacto, y puede lubricarse con gran variedad de líquidos. Se emplea en timones de barco.

También pueden usarse como materiales no metálicos la madera dura y la goma. La madera se emplea desde hace mucho tiempo, y en la actualidad puede encontrarse en cojinetes que trabajan en medios agresivos, por ejemplo en timones y hélices de embarcaciones, pueden ser enterizos o en forma de tablillas insertadas radialmente en el material base. Los cojinetes de goma se fabrican por vulcanización en caliente, pueden ser enterizos con ranuras de lubricación o por piezas para garantizar una buena refrigeración y la salida de partículas abrasivas. Se garantiza que la superficie de fricción sea de mayor dureza que el resto del cojinete para aumentar la resistencia al desgaste de esa zona. Los cojinetes de goma se caracterizan por ser silenciosos y amortiguar vibraciones.

4. Deterioros en cojinetes de deslizamiento. Criterios de comprobación.

Los cojinetes de deslizamiento pueden sufrir varios deterioros: ralladuras, desgaste acelerado, deposición del metal antifricción en el árbol, descorchados, producto de las siguientes causas:

- Fatiga.
- Corrosión.
- Partículas en el lubricante.
- Falta de lubricante o viscosidad insuficiente.
- Desalineamientos.
- Altas presiones.
- Combinaciones inadmisibles de cargas y velocidades.

Si se quiere evitar el deterioro prematuro del cojinete este debe ser diseñado cuidadosamente. Para esto es importante analizar las condiciones de trabajo y con ello decidir que criterio emplear para diseñar el cojinete o comprobarlo. En los cojinetes que trabajan en lubricación límite y semi-límite se debe garantizar la resistencia a las cargas a que estará sometido y prevenir el desgaste adhesivo. A los cojinetes que trabajan en condiciones de lubricación hidrodinámica, se les verifica que no exista el contacto entre las superficies del árbol y cojinete, y que la temperatura del lubricante no exceda la admisible.

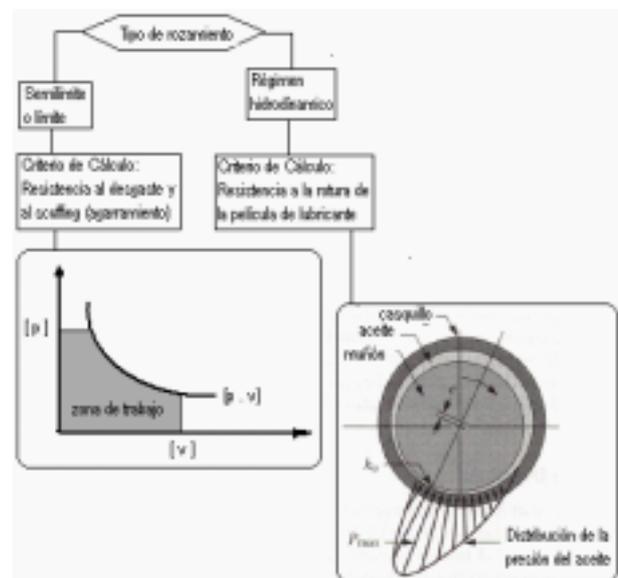


Fig. Diagrama de orientación de los criterios de cálculo de los cojinetes de deslizamiento en dependencia del régimen de lubricación.

4.1 Cojinetes radiales en lubricación semi-límite.

Para cojinetes de deslizamiento que soportan cargas radiales y trabajan en régimen de lubricación semi-límite deben garantizarse las tres (3) siguientes condiciones:

- 1) La presión que se ejerce sobre el cojinete debe ser menor que las presión admisible del material del cojinete.

$$p < [p]$$

Donde:

p : Presión que actúa sobre el cojinete

$$p = \frac{R}{d l} \text{ [MPa]}$$

R : Fuerza radial que actúa sobre el cojinete [N]

d , l : Área proyectada [mm²].

Siendo:

d : Diámetro nominal del cojinete (mm)

l : Longitud nominal del cojinete (mm)

$[p]$ - Presión máxima que soporta el material [MPa].

- 2) La velocidad de desplazamiento de una superficie con respecto a la otra debe ser menor que la admisible.

$$v < [v]$$

Donde:

v - Velocidad relativa [m/s]

$[v]$ - Velocidad máxima [m/s].

- 3) El producto $p.v$ (presión x velocidad) que caracteriza la generación de calor en el cojinete debe ser comparado con el $p.v$ admisible, que depende del material, lubricación, y refrigeración del cojinete.

$$p \cdot v < [p \cdot v]$$

Donde:

p - Presión que actúa sobre el cojinete [MPa]

v - Velocidad relativa [m/s]

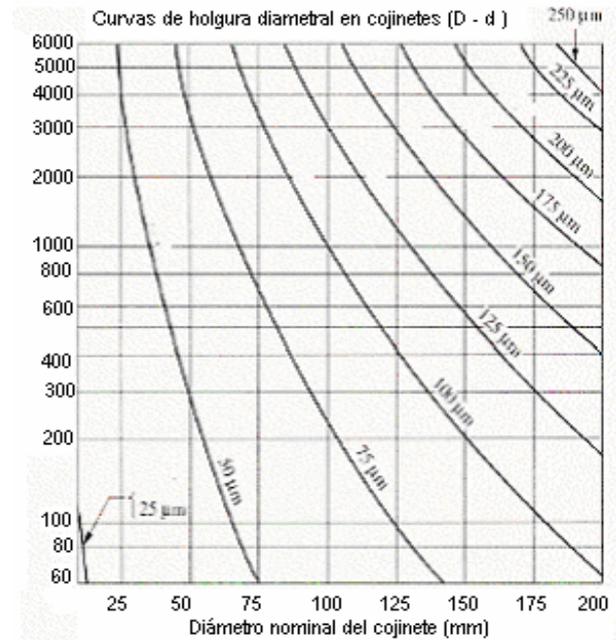
$[p.v]$ - Producto $p.v$ admisible [MPa m/s].

Tabla 1. Propiedades de algunos materiales para cojinetes.

Material	[p] [Mpa]	[v] [m / s]	[p.v] [MPa.m/s]
Bronce	31.7	7.5	1.76
Cobre	-	-	2,62
Hierro	56.36	4	1.76
Resina Fenólica	42.27	12.5	0.528
Nylon	7.045	5	0.105
Teflón	3,52	0.5	0.035
Teflón Reforzado	17.61	5	0.35
Teflón Tejido	422.73	0.25	0.88
Madera	14.9	10	0.528
Carbono Grafitado	4.23	12.5	0.528

Nota: 1 psi-fpm = 0,000035 Mpa.m/s

Es importante tomar en cuenta que los diseños convencionales de cojinetes de deslizamiento estiman una relación $l/d \approx 0,4 - 1,5$. En caso de cojinetes secos o con aceite en sus porosidades (semiseco) una relación de $l/d = 1$ es recomendable. En cojinetes de carbón grafitado la relación se admite hasta $l/d = 1.5$. Solo en casos de cojinetes con diseño de soporte autoalineante es admisible $l/d = 2$.



El gráfico anterior permite recomendar la holgura diametral del cojinete en dependencia del diámetro nominal del cojinete y la frecuencia de rotación del muñón.

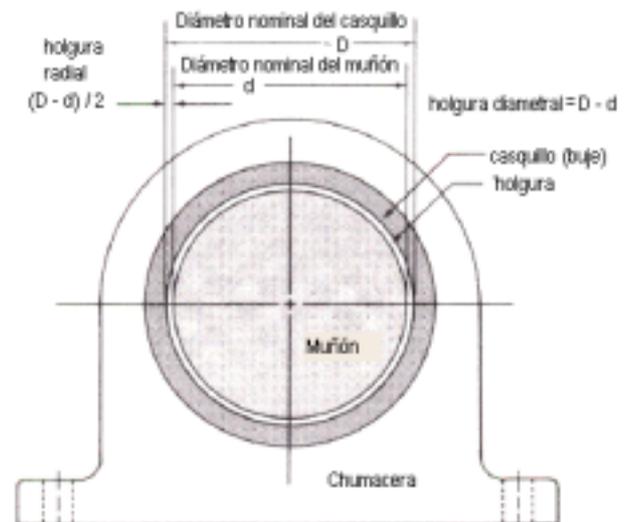


Fig. Cojinete con identificación de la holgura diametral. *

* R.J.Welsh. Plain Bearing Design Handbook. Butterworths. 1983

Otras orientaciones generales[∞] hablan de valores de holgura máxima diametral relativa (Ψ) del orden de:

$$\Psi_{\max} = \frac{D_{\max} - d_{\min}}{d_{\text{nom}}} = 0,0003 \dots 0,005$$

4.2 - Cojinetes radiales en lubricación hidrodinámica.

El procedimiento de cálculo que se ilustra, así como las expresiones que se emplean, es válido sólo para cojinetes de deslizamiento radiales en condiciones de lubricación hidrodinámica que estén sometidos a carga constante en magnitud, sentido y dirección.

La siguiente figura muestra el proceso de de transición de un régimen estacionario a otro hidrodinámico, debe notarse que a medida que aumenta la velocidad de trabajo del muñón y gracias a la untuosidad del aceite aumenta la capacidad portante del cojinete por la creación de una película de aceite con suficiente resistencia para separar las superficies del casquillo y el muñón a una distancia pequeña (h_{\min}), pero suficiente para que no estén en contacto las crestas de las microirregularidades de las superficies.

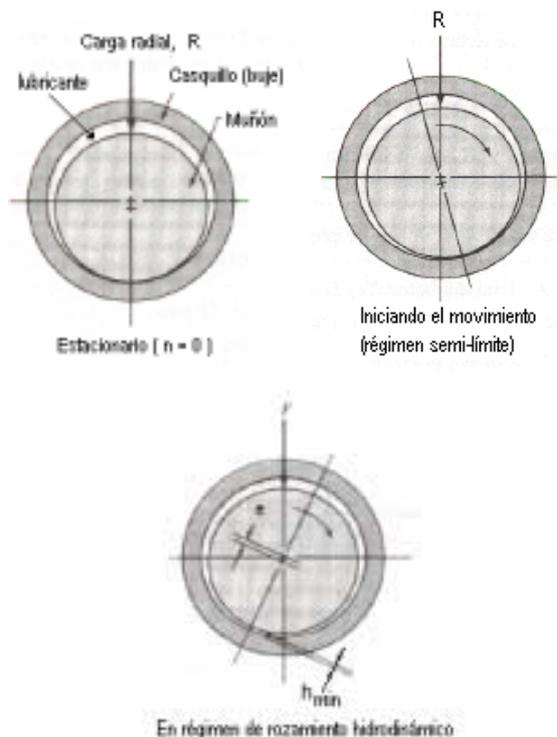


Fig. Cojinete de deslizamiento en régimen de arranque

Es posible deducir, con empleo de los conocimientos de Mecánica de los Fluidos, la siguiente fórmula para evaluar la fuerza radial que puede soportar un cojinete de deslizamiento sin que se rompa la película de lubricante y garantizar un régimen de rozamiento líquido (hidrodinámico).

$$R \leq R_{\text{lim}} = \frac{\mu \cdot n \cdot l \cdot d}{60 \cdot \Psi^2 \cdot S} \quad (\text{N})$$

Donde:

R : Carga radial en el cojinete (N)

R_{lim} : Carga radial máxima que puede soportar el rodamiento sin romper la película de lubricante generada en régimen hidrodinámico (N).

l : Longitud nominal del cojinete (m).

d : Diámetro nominal del cojinete (m).

μ : Viscosidad dinámica del lubricante a la temperatura de trabajo (Pa.s).

Ψ : Holgura diametral relativa al diámetro nominal del cojinete.

S : Factor adimensional (Número de *Sommerfeld*).

La magnitud de holgura diametral relativa del cojinete (Ψ), en la **etapa de diseño** puede ser determinada con ayuda de la gráfica en la anterior pagina y dividiendo entre el diámetro nominal del cojinete (d) en milímetros. Es decir:

$$\Psi = \frac{(D - d)_{\text{grafico}}}{d_{\text{nom}} \cdot 1000}$$

Prácticamente, los diseñadores optan por límites mayores y aceptan valores de holgura mínima en función del diámetro nominal del cojinete. Una relación práctica* en la etapa de diseño es:

$$h_{\min} = 0,00025 \cdot d, \quad \text{siempre que } h_{\min} > h_{\text{lim}}$$

En **casos de comprobación** es necesario emplear la holgura diametral máxima que puede provocar las combinaciones de las tolerancias de las dimensiones del casquillo y el muñón. En este caso es valido aplicar la fórmula:

$$\Psi_{\max} = \frac{D_{\max} - d_{\min}}{d_{\text{nom}}}$$

La magnitud requerida de holgura mínima h_{\min} puede ser establecida por el espesor límite en la película de lubricante que separa las crestas de las microirregularidades de las superficies en el cojinete de deslizamiento. Este hecho, permite plantear la siguiente formulación teórica a partir de las condiciones tecnológicas de elaboración, y valida para cálculos de comprobación.

[∞] Dobrovolski. Elementos de Máquinas. Editorial MIR. 1981.

* Mott, R. L. Machine Elements in Mechanical Design. Editorial Prentice. 1999

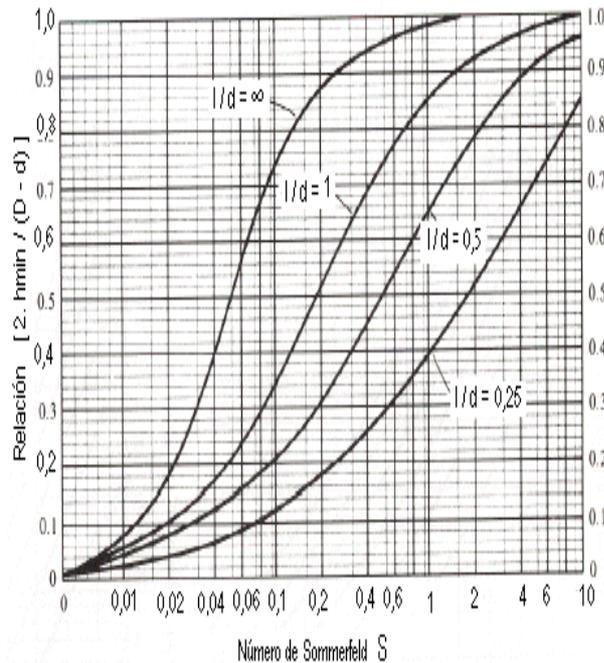
Fórmula para definir la holgura límite y proponer la mínima en dependencia de las rugosidades de las superficies, nivel de seguridad y deformación en el pivote:

$$h_{\min} \geq h_{\lim} = K \left(\frac{R_{z1} + R_{z2}}{1000} + y_{\text{piv}} \right)$$

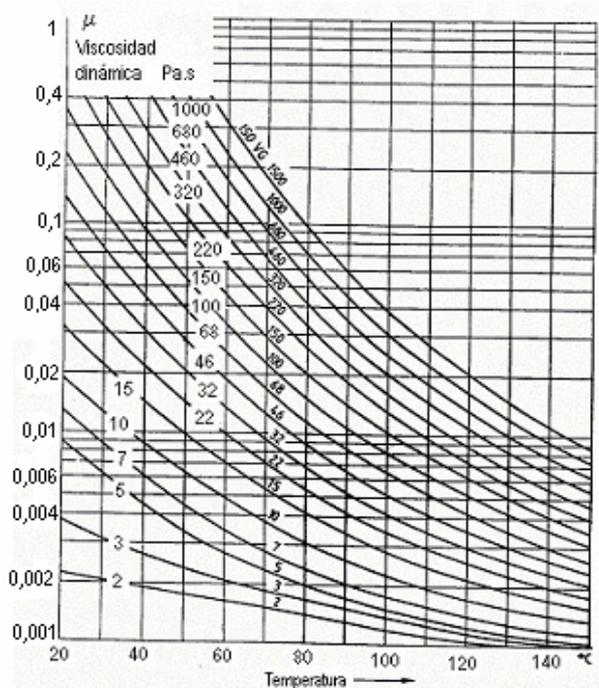
Donde:

- h_{\min} : Espesor mínimo de la película de lubricante (mm).
- h_{\lim} : Holgura mínima para garantiza un régimen de rozamiento hidrodinámico (mm).
- K: Margen de seguridad. (K = 1.21.5)
- R_{z1}, R_{z2} : Rugosidad superficial máxima del árbol en el muñón y en el casquillo del cojinete [μm]*.
- y_{piv} :Deflexión radial (flecha) del árbol en el interior del cojinete [mm]. Para cojinetes autoalineados $y_{\text{piv}} = 0$.

El factor adimensional S, ó como usualmente se le conoce: número de Sommerfeld, puede ser determinado gráficamente en función de la relación espesor mínimo de película y la holgura radial [2. ($h_{\min} / (D - d)$)] y la relación [l / d].



La viscosidad dinámica de los aceites en dependencia de la temperatura la brindan los fabricantes en diagramas μ vs T . En clases será utilizado un grafico de la razón de viscosidad de los aceites caracterizados con su grado ISO VG de la norma ISO 7902:1998.



Autopreparación:

1) Se conoce que un árbol de acero C45 trabajará con rozamiento mixto en sus cojinetes de teflón. Determine sus dimensiones si queremos que tenga una relación l/d normal ($l/d = 1$).

Datos:
Frecuencia de rotación del cojinete $n = 50$ rpm.
Carga radial $R = 1000$ N.

2) Realice el cálculo de comprobación en régimen de lubricación hidrodinámica de un cojinete de deslizamiento autoalineante con las siguientes características. Además, proponga modificaciones para aumentar su capacidad de carga.

Datos:
Materiales: Cojinete de Bronce y de árbol acero 45.
Carga radial $R = 40\,000$ N
Frecuencia de rotación $n = 200$ rpm.
Longitud del cojinete $l = 60$ mm
Diámetro máximo del muñón: $d_{\max} = 119.95$ mm
Diámetro mínimo del muñón: $d_{\min} = 119.93$ mm
Diámetro máximo del agujero en casquillo $D_{\max} = 120.07$ mm
Diámetro mínimo del agujero en casquillo $D_{\min} = 120.05$ mm
Aceite ISO VG 100 a la temperatura de 100°C
Rugosidades máximas media $Rz1 = Rz2 = 4 \mu\text{m}$

* $1 \mu\text{in} = 0,0254 \mu\text{m}$