

## 28.1 Introducción

En este capítulo se estudian las últimas propiedades que debemos considerar en este libro de materiales de ingeniería: las propiedades de fricción entre materiales que se encuentran en contacto y el consiguiente desgaste cuando tiene lugar el deslizamiento o movimiento de uno sobre otro. Estas propiedades son de considerable importancia en diseño mecánico. Las fuerzas de fricción son indeseables en los cojinetes por la energía que se pierde, mientras que el desgaste es perjudicial porque da lugar a malas tolerancias de trabajo y, en última instancia, al fallo del componente. Por otro lado, cuando se trata de seleccionar materiales para embragues y frenos, o incluso para suelas de zapatos, se busca, por razones evidentes, maximizar la fricción pero minimizando el desgaste. Sin embargo, el desgaste no siempre es negativo: en las operaciones de desbaste y pulido metalográfico tratamos de alcanzar el máximo desgaste posible con el mínimo consumo energético por fricción; y sin desgaste no podríamos escribir con tiza en una pizarra ni con lápiz sobre un papel. En este capítulo y en el siguiente se presentarán los fundamentos de la fricción y el desgaste, y se ilustrará su influencia en el diseño de piezas con algunos casos prácticos.

## 28.2 Fricción entre materiales

Como sabemos, cuando dos materiales están en contacto, cualquier intento de mover uno sobre otro implica vencer una fuerza, la *fuerza de rozamiento* (Figura 28.1). La fuerza que permite que comience el movimiento,  $F_s$ , está relacionada con la fuerza  $P$  normal a la superficie de contacto, mediante

$$F_s = \mu_s P \quad (28.1)$$

siendo  $\mu_s$  el *coeficiente de rozamiento estático*. Una vez que el movimiento ha comenzado, la fuerza de rozamiento disminuye ligeramente, cumpliéndose

$$F_k = \mu_k P \quad (28.2)$$

donde  $\mu_k (< \mu_s)$  es el *coeficiente de rozamiento dinámico* (Figura 28.1). El trabajo realizado para vencer la fricción dinámica aparece en forma de *calor*:

A primera vista, estos resultados parecen ir contra nuestra intuición. ¿Cómo explicar que la fricción entre dos superficies pueda depender únicamente de la *fuerza*  $P$  normal que los mantiene en contacto, y no de su área? Para entender este comportamiento debemos estudiar la geometría de una superficie típica.

Si se examina la superficie de un corte oblicuo de una barra de cobre con un acabado superficial fino (de tal manera que se magnifique la altura de las asperezas), o si se obtiene su perfil con un rugosímetro (un aparato similar a la aguja de un tocadiscos que, al deslizarse sobre una superficie, dibuja los picos y valles de ésta), se observa una gran cantidad de proyecciones o *asperezas* en la superficie, como ilustra la Figura 28.2. Si el metal se desbasta con la lija más fina, la dimensión de las asperezas disminuirá, pero

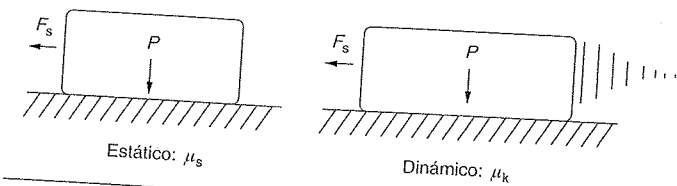


Figura 28.1 Coeficientes de rozamiento estático y dinámico.

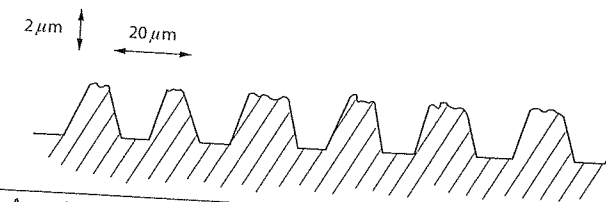


Figura 28.2 Aspecto que presenta la superficie de un metal finamente mecanizado observado a gran aumento (la altura de las asperezas ha sido dibujada a mayor escala que las distancias entre ellas).

continuarán estando en la superficie. Incluso aunque la superficie del metal se pule durante mucho tiempo utilizando el producto de pulido más fino, las microasperezas seguirán permaneciendo.

En consecuencia, si ponemos dos superficies en contacto, independientemente del grado de mecanizado o pulido con que se hayan fabricado, sólo estarán en contacto en puntos concretos, donde las asperezas de ambas se encuentran. ¡Es como darle la vuelta a Austria y ponerla encima de Suiza! La carga que mantiene juntas las superficies se aplica únicamente en los contactos entre asperezas. El área *real* de contacto,  $a$ , es muy pequeña, y por ello la tensión  $P/a$  (carga/área) en cada aspereza es muy grande.

Si la fuerza aplicada entre dos superficies fuera muy baja, las asperezas se deformarían elásticamente en los puntos en que se tocan. Con fuerzas realistas, sin embargo, las altas tensiones provocan deformaciones *plásticas* importantes en las puntas de las asperezas. Si cada aspereza se deforma, formando una unión con su opuesta, la fuerza total transmitida a través de la superficie (Figura 28.3) es

$$P \approx a \sigma_y \quad (28.3)$$

donde  $\sigma_y$  es el límite elástico a compresión. En otras palabras, el área real de contacto viene dada por

$$a \approx \frac{P}{\sigma_y} \quad (28.4)$$

Obviamente, si duplicamos el valor de  $P$ , el área de contacto real,  $a$ , será también doble.

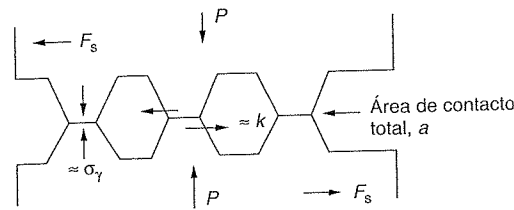


Figura 28.3 El área real de contacto entre las superficies es menor de lo que parece, ya que éstas se tocan sólo en los contactos entre asperezas.

Veamos cómo la geometría del contacto influye en la fricción. Si intentamos mover una de las superficies sobre la otra, aparece una tensión cortante  $F_s/a$  en las asperezas. Ésta es máxima donde el área de la sección transversal de las asperezas es mínima, es decir, en el plano de contacto o muy cerca de él. La intensa deformación plástica en las zonas de contacto tiende a juntar las puntas de las asperezas tan íntimamente que, a lo largo de la superficie de contacto, las uniones son átomo a átomo. Por tanto, la unión puede soportar una tensión cortante aproximadamente igual a  $k$ , siendo  $k$  el límite elástico a cortadura del material (Capítulo 11).

Las asperezas cederán, produciéndose el movimiento cuando

$$\frac{F_s}{a} \geq k$$

o, dado que  $k \approx \sigma_y/2$ , cuando

$$F_s \approx ak \approx a\sigma_y/2 \quad (28.5)$$

Combinando lo anterior con la ecuación (28.3) tendremos

$$F_s \approx \frac{P}{2} \quad (28.6)$$

que es precisamente la ecuación empírica (28.1) que se presentó al comienzo, con  $\mu_s \approx 1/2$ . Ahora esta ecuación ya no es empírica sino que se ha deducido a partir de un modelo del proceso de deslizamiento. El valor  $\mu_s \approx 1/2$  es cercano a los valores de los coeficientes de rozamiento estáticos entre superficies no lubricadas de materiales metálicos, cerámicos y vidrios.

¿Cómo se explica el menor valor de  $\mu_k$ ? Una vez que las superficies están en movimiento, los átomos tienen menos tiempo para formar uniones átomo-átomo en los contactos entre asperezas que cuando las superficies están en contacto estático; esto es equivalente a considerar que el área de contacto sobre la cual se aplica el esfuerzo cortante se ve reducida. En cuanto se detiene el movimiento la fluencia permite que los contactos crezcan ligeramente, y la difusión permite que las uniones se hagan más fuertes, por lo que  $\mu$  alcanza otra vez el valor  $\mu_s$ .

## 28.3 Valores de los coeficientes de rozamiento

Si limpiamos concienzudamente las superficies de los metales en vacío, es prácticamente imposible deslizarlas unas sobre otras. Cualquier esfuerzo cortante provoca un aumento de la plasticidad en las uniones, que crecen rápidamente y provocan una adherencia completa ( $\mu > 5$ ) de las superficies. Esto es un problema en el espacio exterior, así como en ciertas atmósferas (por ejemplo  $H_2$ ) que eliminan cualquier película de la superficie de los metales. Una pequeña cantidad de oxígeno o de  $H_2O$  reduce considerablemente  $\mu$  al crear una película de óxido que evita la formación de uniones metálicas grandes.

Como se vio en el Capítulo 24, todos los metales excepto el oro tienen una capa más o menos delgada de óxido en su superficie. Experimentalmente se observa que en algunos metales la unión entre las capas de óxido formadas en los extremos de las asperezas es más débil frente a tensiones cortantes que las del metal sobre el que aparecen (Figura 28.4). En estos casos, el deslizamiento de las superficies tiene lugar sobre la fina capa de óxido a una tensión menor que en el propio metal, lo que conduce a una reducción de  $\mu$  a valores comprendidos entre 0,5 y 1,5.

Cuando dos metales blandos se mueven uno sobre otro (por ejemplo plomo sobre plomo, Figura 28.5), las uniones son débiles pero su área es grande, por lo que  $\mu$  es alto; cuando se trata de dos metales duros (por ejemplo acero sobre acero) las uniones son pequeñas, pero fuertes, y de nuevo la fricción es alta (Figura 28.5). Muchos cojinetes están fabricados con una película delgada de un metal blando entre dos duros, proporcionando uniones débiles de área pequeña. Los cojinetes de metal blanco, por ejemplo, son aleaciones blandas de plomo o estaño aplicadas sobre una matriz de fases más duras; los cojinetes de bronce están formados por partículas de plomo (que forman una película lubricante) embebidas en una matriz de bronce; y los cojinetes porosos impregnados con polímeros están fabricados de cobre parcialmente sinterizado con un polímero (normalmente PTFE) introducido en sus poros. Estos cojinetes no se diseñan para funcionar en seco, pero si la lubricación falla, el componente blando proporciona un coeficiente de fricción entre 0,1 y 0,2, que puede ser suficientemente bajo como para evitar un calentamiento excesivo y el gripado del cojinete.

La fricción entre materiales cerámicos (Figura 28.5) es menor. La mayoría de los materiales cerámicos son muy duros (con buenas propiedades al desgaste), son estables en aire y agua (al contrario que los metales, con la excepción del oro, que no lo son real-

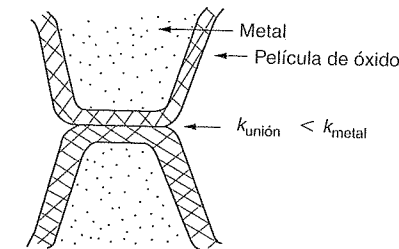


Figura 28.4 Las uniones recubiertas de óxido a menudo pueden deslizar más fácilmente que las de las superficies limpias.

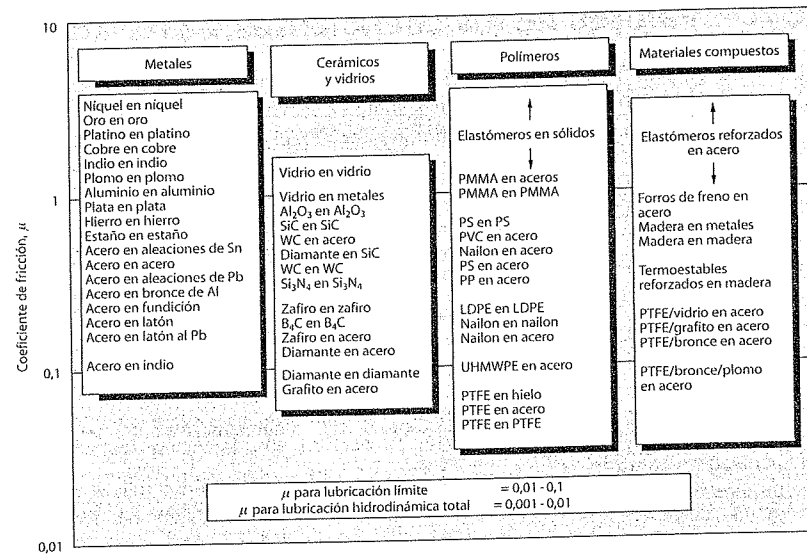


Figura 28.5 Diagrama de barras que muestra los valores del coeficiente de rozamiento estático para varias combinaciones de materiales.

mente aunque lo parezca), tienen poca tendencia a enlazarse químicamente y responden a los esfuerzos cortantes con mayor facilidad.

Cuando los metales se deslizan sobre un polímero, la fricción también está causada por uniones adhesivas, en las que se transfiere una fina película del polímero al metal. Cualquier flujo plástico tiende a orientar las cadenas del polímero en dirección paralela a la superficie de deslizamiento y, en esta disposición, también responden a los esfuerzos cortantes con facilidad; por ello  $\mu$  es bajo, con valores entre 0,05 y 0,5 (Figura 28.5). Con polímeros se pueden fabricar cojinetes de baja fricción, aunque presentan varios inconvenientes: las moléculas del polímero se eliminan con facilidad de la superficie de deslizamiento, por lo que el desgaste es elevado, y puesto que la fluencia permite el crecimiento de las uniones cuando el metal está detenido, el coeficiente de fricción estático,  $\mu_s$ , algunas veces es mucho mayor que el dinámico,  $\mu_k$ .

Los materiales compuestos se pueden diseñar para tener alta fricción (forro de frenos) o baja fricción (cojinetes a base de PTFE/bronce/plomo), como se observa en la Figura 28.5. Veremos más sobre esto a continuación.

## 28.4 Lubricación

Como decíamos en la introducción, el rozamiento provoca pérdidas de trabajo en los mecanismos y, aparte de la pérdida de potencia, ese trabajo se convierte en calentamiento de las superficies en contacto, pudiendo dañar el cojinete e incluso llegar a fundirlo. Para minimizar las fuerzas de rozamiento hay que facilitar al máximo el deslizamiento de las

superficies en contacto. La manera más obvia consiste en añadir alguna sustancia en la punta de las asperezas de forma que: (a) pueda soportar la presión en la superficie del cojinete evitando el contacto átomo-átomo entre las asperezas; (b) pueda responder fácilmente a los esfuerzos cortantes.

Los polímeros y los metales blandos, como ya hemos dicho, tienen este comportamiento, pero cuando buscamos reducciones mucho mayores del valor de  $\mu$  debemos recurrir a los lubricantes. Los más habituales son aceites, grasas y sustancias grasas como jabones o grasas animales. Estas sustancias "contaminan" las superficies formando una fina película de aceite o grasa que evita la adhesión y responde fácilmente a esfuerzos cortantes, disminuyendo el coeficiente de fricción. Lo que no es tan evidente es por qué el aceite fluido no es expulsado de entre las asperezas por las altas presiones generadas en los contactos. Una razón es que, hoy día, a los aceites se les añade una pequeña cantidad ( $\approx 1\%$ ) de moléculas orgánicas activas. Un extremo de cada molécula reacciona con el óxido metálico de la superficie, adhiriéndose a él, y el otro extremo queda orientado perpendicularmente a la superficie; el conjunto de moléculas absorbidas forma una monocapa molecular (Figura 28.6) capaz de resistir fuerzas normales a la superficie muy elevadas (separando de este modo los extremos de las asperezas de manera muy efectiva). Las dos monocapas en un contacto pueden separarse con facilidad mediante esfuerzos cortantes. Este tipo de lubricación se denomina *lubricación parcial o límite*, y es capaz de reducir el valor de  $\mu$  diez veces (Figura 28.5). La *lubricación hidrodinámica* es aún más efectiva; la veremos en el próximo capítulo.

Hasta los mejores lubricantes dejan de trabajar por encima de 200 °C. Los cojinetes de metales blandos pueden resistir puntos calientes localizados: el metal blando funde y proporciona una película lubricante. Pero cuando se diseña un cojinete para trabajar a alta temperatura se necesitan lubricantes especiales. Los mejores son las suspensiones de PTFE en aceites especiales (útiles hasta 320 °C), el grafito (hasta 600 °C) y el disulfuro de molibdeno (hasta 800 °C).

## 28.5 Desgaste de materiales

Incluso cuando las superficies sólidas están protegidas por películas de óxido y capas de lubricante, es posible que se produzca algún contacto sólido-sólido en zonas donde el recubrimiento de óxido haya desaparecido por efecto de las cargas mecánicas y, en consecuencia, la absorción de los lubricantes sea baja. Este contacto íntimo produce el *desgaste* de los materiales. Podemos clasificar el desgaste en dos tipos principales: *adhesivo* y *abrasivo*.

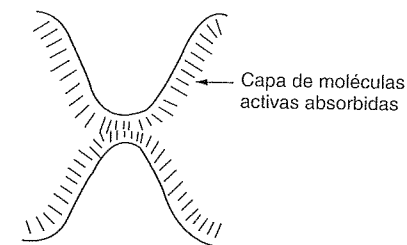


Figura 28.6 Lubricación límite.

**Desgaste adhesivo**

La Figura 28.7 muestra que si la adhesión entre átomos de A y B es suficientemente buena, los fragmentos de desgaste se desprenden del material más blando. Si A y B son el mismo material, el desgaste se produce en ambas superficies —la cantidad de partículas de desgaste disminuye y se pierden o quedan atrapadas entre las superficies, causando problemas posteriores (ver más abajo). El tamaño de las partículas depende de la distancia a que tiene lugar el esfuerzo cortante respecto de la unión; si el endurecimiento por deformación alcanza gran parte de la aspereza, la tendencia será a producir tamaños grandes. Para minimizar la *velocidad de desgaste* obviamente se necesita minimizar el tamaño de las partículas eliminadas. La manera de conseguirlo consiste en minimizar el área de contacto  $a$ . Dado que  $a \approx P/\sigma_p$ , reduciendo la carga sobre las superficies el desgaste se reducirá, como intuitivamente se puede comprender. Esto es lo que ocurre, por ejemplo, con una tiza sobre una pizarra: cuanto mayor sea la presión, más fuerte será la línea (pista de desgaste). Una segunda manera de reducir el área  $a$  consiste en aumentar  $\sigma_p$ , o sea la *dureza*; por ejemplo, cuanto más duros son los lápices, más fino es su trazo.

**Desgaste abrasivo**

Los fragmentos de material producidos por el desgaste abrasivo a menudo se separan de las asperezas durante el deslizamiento continuado de las superficies. Puesto que el oxígeno es deseable en los lubricantes (para ayudar a mantener la capa de óxido entre las partes metálicas en contacto), las partículas de desgaste pueden llegar a oxidarse y formar partículas de óxido duras que erosionen las superficies, a modo de papel de lija.

La Figura 28.8 muestra cómo un material duro puede arrancar partículas de desgaste de un material más blando, produciendo un desgaste abrasivo importante. El desgaste abrasivo no siempre está producido por partículas del propio material de las superficies, sino que puede estar causado por partículas de suciedad (por ejemplo arena) que pueden entrar en el sistema o, como en el caso de los motores, por productos de la combustión —por esto es tan importante filtrar el aceite.

Evidentemente, la velocidad de desgaste abrasivo puede reducirse haciendo más pequeña la carga, como en un ensayo de dureza, de forma que la partícula de metal más duro

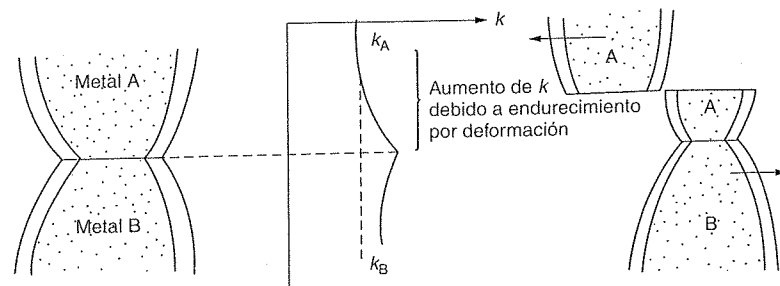


Figura 28.7 Desgaste adhesivo.

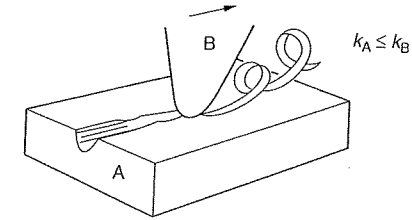


Figura 28.8 Desgaste abrasivo.

“arañe” con menos profundidad al más blando. Aumentar la dureza del metal tiene el mismo efecto que en el desgaste adhesivo. Ya se ha comentado que el desgaste por abrasión es indecible en la mayor parte de los casos —como en maquinaria—, pero nos podemos valer de él para afilar herramientas, pulir ornamentos de latón o perforar rocas.

## 28.6 Propiedades superficiales e intrínsecas

Muchas son las consideraciones que hay que tener en cuenta a la hora de elegir un material adecuado para un cojinete. El material debe tener un conjunto de propiedades que le permitan soportar elevadas cargas y transmitir flujos de calor. Debe poder ser procesado, es decir, conformado, acabado y unido. Debe cumplir criterios económicos tales como el coste y la disponibilidad, entre otros. Si cumple todos estos requisitos tendrá que tener (o habrá que aportarle) las propiedades superficiales necesarias para minimizar el desgaste y, cuando se necesite, mejorar la resistencia a la corrosión.

Por ello, los materiales para cojinetes no se eligen sólo por sus propiedades de fricción o desgaste (denominadas propiedades “tribológicas”) sino que tienen que seleccionarse en un marco más general que tenga en cuenta el diseño en su conjunto. Una manera de hacerlo consiste en elegir un material con buenas propiedades intrínsecas y luego adaptar su superficie a los requerimientos específicos del diseño mediante tratamientos especiales o con recubrimientos. En la mayoría de los casos las propiedades superficiales son las que determinan la respuesta tribológica, aunque la región inmediatamente debajo de la superficie es evidentemente muy importante, ya que soporta a la propia superficie.

Existen dos maneras de adecuar las superficies. En las dos, el objetivo es aumentar la dureza de la superficie o reducir la fricción, o ambas. La primera consiste en realizar *tratamientos superficiales*, que cambien ligeramente la composición química de las superficies. Estos tratamientos aprovechan el aumento de la dureza producido por la absorción de átomos de otro material en una fina capa de la superficie; en la cementación (carbono), en la nitruración (nitrógeno) y en la boruración (boro) la superficie se endurece por difusión de estos elementos procedentes de un gas, líquido o sólido a altas temperaturas. Los aceros, que ya contienen carbono, se pueden endurecer superficialmente por calentamiento rápido mediante una llama, un chorro de electrones o un láser, seguido de un enfriamiento rápido. Por muy elaborados que puedan parecer, estos procedimientos son estándar, ampliamente usados y con muy buenos resultados.

El segundo método de adecuar las superficies, con *recubrimientos superficiales*, es más difícil y más caro, pero a menudo merece la pena. Consiste en la aplicación sobre las superficies de capas de aleaciones de wolframio, cobalto, cromo o níquel, que son duras y resistentes a la corrosión; casi siempre suele ser necesario un proceso de acabado para recuperar las tolerancias dimensionales. También se pueden depositar recubrimientos de cerámicas duras, tales como  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiC}$  o  $\text{TiN}$ , por métodos de plasma, las cuales no sólo proporcionan resistencia al desgaste sino también resistencia a la oxidación y a otros tipos de ataque químico. Hoy día es posible depositar diamante (y materiales similares) en las superficies para protegerlas de prácticamente cualquier ataque.

## Ejemplos

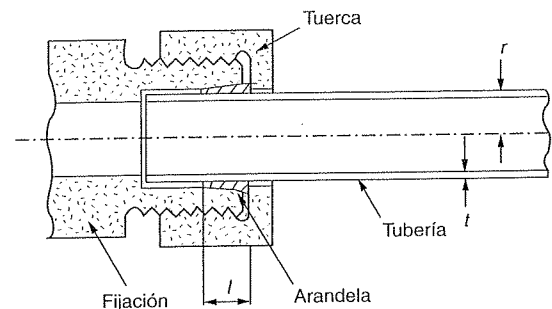
**28.1** Explicar los fundamentos de la fricción entre superficies sólidas en contacto.

**28.2** El diagrama muestra una junta de compresión para sujetar una tubería de agua de cobre. Para ensamblar la junta, primero se pasa la tubería a través de la hembra y a continuación se coloca una arandela circular de cobre blando. Se enrosca del todo la tuerca y finalmente se gira hasta un ángulo específico que comprime la arandela sobre la superficie de la tubería. El ángulo se elige de manera que sea suficiente para que la sección transversal de la tubería se deforme a compresión en la zona de contacto con la arandela. Demuestre que la presión de agua requerida para que la tubería se desprenda de la unión viene dada aproximadamente por

$$P_w = 2\mu\sigma_y \left( \frac{t}{r} \right) \left( \frac{l}{r} \right)$$

donde  $\mu$  es el coeficiente de rozamiento entre la arandela y la parte exterior de la tubería.

Calcular  $P_w$  considerando los siguientes datos:  $t = 0,65$  mm,  $l = 7,5$  mm,  $r = 7,5$  mm,  $\mu = 0,15$  y  $\sigma_y = 120$  MPa. Comente su respuesta teniendo en cuenta las presiones hidrostáticas típicas en sistemas hidráulicos. (La carga axial en la junta es  $p_w \pi r^2$ ; la presión radial aplicada por la arandela en el exterior de la tubería es  $P = \sigma_y t/r$ .)



### Respuesta

3,1 MPa, o 31 bar.

- 28.3** Dé ejemplos, de su propia experiencia, de situaciones en que el rozamiento es (a) deseable y (b) indeseable.
- 28.4** Dé ejemplos, de su propia experiencia, de situaciones en que el desgaste es (a) deseable y (b) indeseable.

## Capítulo 29

### Casos prácticos de fricción y desgaste

#### Contenidos

29.1 Introducción	382
29.2 Caso práctico 1: diseño de cojinetes lisos	382
29.3 Caso práctico 2: materiales para esquíes y trineos	385
29.4 Caso práctico 3: elastómeros de alta fricción	387
Ejemplos	389



## 29.1 Introducción

En este capítulo trataremos tres problemas diferentes en los que intervienen el rozamiento y el desgaste. El primero de ellos incluye la mayoría de los conceptos que se presentaron en el Capítulo 28; se trata de un eje de sección circular girando en un cojinete cilíndrico. Este tipo de *cojinete liso* es habitual en las máquinas rotativas o alternativas; los cojinetes del cigüeñal de un automóvil son un buen ejemplo. El segundo problema es completamente diferente y en él se tendrán en cuenta las propiedades de fricción del hielo en el diseño de esquís y trineos. El tercer caso nos introduce en algunas de las propiedades de fricción de los polímeros: la selección de cauchos para cubiertas antideslizantes.

## 29.2 Caso práctico 1: diseño de cojinetes lisos

En un cojinete liso bien lubricado y que funcione de manera correcta, las propiedades de fricción y desgaste de los materiales son, sorprendentemente, irrelevantes. Esto se debe a que las superficies de los componentes nunca se tocan, sino que se mantienen separadas por una fina película de aceite a presión formada en condiciones de *lubricación hidrodinámica*. La Figura 29.1 muestra una sección transversal de un cojinete trabajando hidrodinámicamente. La carga aplicada sobre el sistema empuja al eje hacia un lado, de modo que el espacio libre queda casi todo concentrado en un solo lado. Dado que el lubricante es viscoso, el eje, al girar, lo distribuye a su alrededor. La acumulación del flujo de lubricante en la zona donde las superficies están más cercanas provoca un incremento de la presión en la película de lubricante, y esta presión levanta el eje y lo separa de la superficie del cojinete. En estas condiciones es habitual encontrar valores de presión entre 10 y 100 atmósferas. Siempre que el lubricante sea bastante viscoso, la película en su zona más delgada será suficientemente gruesa como para conseguir una separación completa de las superficies de contacto. Bajo condiciones hidrodinámicas *ideales* no hay contacto entre asperezas y, por tanto, no existe desgaste. El deslizamiento de las superficies tiene lugar por cizalladura en el propio líquido lubricante, alcanzándose coeficientes de fricción del orden de 0,001 a 0,005.

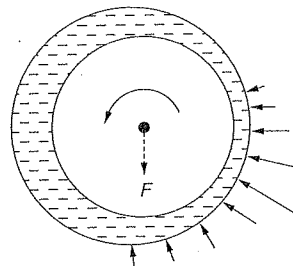


Figura 29.1 Lubricación hidrodinámica.

La lubricación hidrodinámica es perfecta si todo funciona de forma correcta. Pero los cojinetes lisos reales contienen suciedad —normalmente partículas duras de sílice— y es bien sabido que los motores de los automóviles nuevos contienen partículas duras de fundición procedentes de las operaciones de mecanizado del bloque del motor. Si las partículas son más gruesas que la parte más fina de la película de lubricante, tendrá lugar desgaste abrasivo. Hay dos maneras de resolver este problema. Una de ellas es hacer las superficies de contacto más duras que las partículas. Las partes del cigüeñal en contacto con los cojinetes se “endurecen superficialmente” mediante tratamientos químicos y térmicos especiales (Capítulo 28) para aumentar la dureza superficial hasta un grado tal que las partículas de impurezas sean desgastadas por el cojinete. Es importante no endurecer todo el eje porque lo haría frágil y podría romperse bajo los efectos de una carga súbita. Las superficies de los cojinetes, sin embargo, no se endurecen de esta manera, ya que mantenerlas blandas es ventajoso. En primer lugar, si el metal del cojinete es lo suficientemente blando, las impurezas se incrustan en su superficie y dejan de ser un problema. La capacidad de los materiales con que se fabrican los cojinetes para atrapar o *embeber* las impurezas es importante. En segundo lugar, un cojinete sólo trabaja en condiciones de lubricación hidrodinámica cuando la velocidad de rotación del sistema es suficientemente alta. Cuando arrancamos un motor, o a velocidades bajas, la lubricación hidrodinámica no se produce y opera la *lubricación límite* (Capítulo 28). Bajo estas condiciones tendrá lugar algún tipo de contacto y desgaste de las superficies (es por esto que los motores de coche duran menos cuando se usan para viajes cortos que largos). La sustitución del cigüeñal desgastado es difícil y cara, mientras que los cojinetes se pueden diseñar para que su reemplazo sea fácil y barato, como se muestra en la Figura 29.2. Por tanto, es una buena práctica concentrar en el *cojinete* todo el desgaste que sea posible y, como se mostró en la sección relativa a desgaste adhesivo en el capítulo anterior, lo que se hace es utilizar un material más blando para el cojinete: plomo, estaño, zinc o aleaciones de estos metales.

Sin embargo, si se utiliza un material blando para el cojinete, ¿será capaz de soportar las fuerzas normales a las que está sometido el cigüeñal? Todos los materiales de los cojinetes tienen un cierto rango “*p-v*” en el cual funcionan de manera segura (Figura 29.3). La presión máxima, *p*, que el cojinete puede soportar viene determinada por la dureza de su superficie; la máxima velocidad, *v*, está determinada por el calentamiento y,

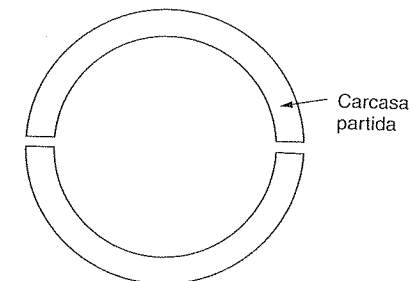


Figura 29.2 Cojinetes fácilmente reemplazables.

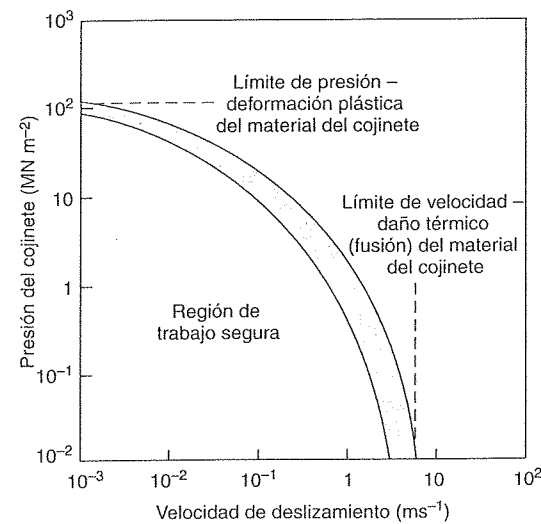


Figura 29.3 Diagrama presión-velocidad para un material utilizado en cojinetes. ✓

por tanto, por la conductividad térmica de material de que está fabricado. Por ello, si no hacemos nada para prevenirlo, un cojinete blando se deformará bajo la presión aplicada como si fuera masilla. En la práctica este problema se puede evitar haciendo la capa de material blando fina y reforzándola con otra capa externa mucho más dura.

La forma en que trabaja es la siguiente. Si apretamos un trozo de plastilina entre dos bloques de madera, al principio se deforma fácilmente, pero a medida que la capa de plastilina se hace más y más fina se necesita más flujo lateral para extenderla, y la presión requerida para producir este flujo es cada vez mayor. La plastilina está limitada por los bloques, de manera que nunca podrá ser totalmente aplastada, ya que esto supondría una presión infinita. Este principio de *restricción plástica* se utiliza en el diseño de los cojinetes depositando una finísima capa (alrededor de 0,03 mm) de aleación blanda en la carcasa del cojinete. Esta capa es lo suficientemente gruesa como para embeber la mayor parte de las impurezas, pero lo bastante delgada como para soportar las fuerzas del cojinete liso.

Este material blando también tiene una función importante si se produjera un fallo en el aporte de lubricante al cojinete. Si esto ocurriera, el calentamiento por fricción elevaría rápidamente la temperatura del cojinete y provocaría un extenso contacto metal-metal, la unión atómica entre el cojinete y el eje, y el consiguiente bloqueo del sistema. Un cojinete de material blando, o de bajo punto de fusión podría deformarse por cizalladura en respuesta a las fuerzas aplicadas, e incluso podría fundirse localmente. Esto ayudaría a proteger al cojinete de daños superficiales más graves y también ayudaría a evitar roturas de componentes debidas a bloqueos repentinos de las superficies de contacto.

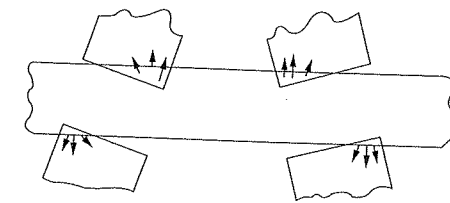


Figura 29.4 Conformabilidad de los cojinetes. Si un material usado para cojinetes es fácilmente conformable, se deformará para ajustarse a pequeñas desalineaciones.

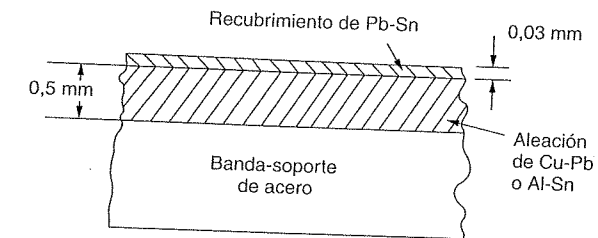


Figura 29.5 Esquema de una sección transversal de un cojinete formado por varias capas.

La tercera ventaja de utilizar un material blando es su *capacidad para ser conformado*. Pequeños desajustes de los cojinetes se pueden autocorregir si el metal del cojinete se deforma plásticamente con facilidad (Figura 29.4). Existe una clara relación entre su capacidad de soportar cargas y su conformabilidad.

Puesto que la mencionada capa delgada de estaño-plomo puede desgastarse en condiciones de operación severas antes del final de la vida útil del cojinete, es habitual colocar una segunda capa más gruesa y más dura entre la capa blanda superior y el soporte de acero (Figura 29.5). Las aleaciones que se usan normalmente son cobre-plomo y aluminio-estaño. En caso de que el desgaste atravesara la capa blanda, queda una segunda capa todavía lo suficientemente blanda como para actuar sin que se produzca un daño irreparable en el sistema.

Al final, los materiales para cojinetes han evolucionado tanto por la experiencia como por la ciencia. La Tabla 29.1 recoge algunos de ellos.

## 29.3 Caso práctico 2: materiales para esquís y trineos

Los esquís, tanto para personas como para aviones, solían fabricarse de madera encerada. Por debajo de aproximadamente  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  la fricción de la madera encerada sobre la nieve es muy baja  $-\mu$  es alrededor de 0,02; si no fuera así, los aviones equipados con esquís no



Tabla 29.1 Materiales para cojinetes lubricados con aceite.

Material	Aplicación
"Metal blanco" -aleaciones de estaño 88% Sn, 8% Sb, 4% Cu	Árbol de levas, articulación del pie de biela en motores de combustión interna
"Metal blanco" -aleaciones de plomo 75% Pb, 12% Sn, 13% Sb, 1% Cu	Maquinaria general que opera a bajas presiones
Cobre-plomo: 70% Cu, 30% Pb	Cojinetes de cigüeñales y de árboles de levas de motores de c.i.; cojinetes de turbocompresores
Bronce al plomo 75% Cu, 20% Pb, 5% Sn	Motores de c.i. de altas prestaciones, árboles de levas, cajas de cambios
Bronce-fósforo 88% Cu, 11% Sn, 1% P	Cojinetes de alta resistencia para cajas de cambios, rodillos de laminación, casquillos de los pies de biela, etc., a menudo utilizados con recubrimientos de metal más blando
Aluminio-estaño 60% Al, 40% Sn	Cojinetes para cigüeñales de alta resistencia para motores diesel. Se puede utilizar con recubrimiento de material más blando
Acetal-acero	Maquinaria general en la cual se requiera baja fricción de arranque

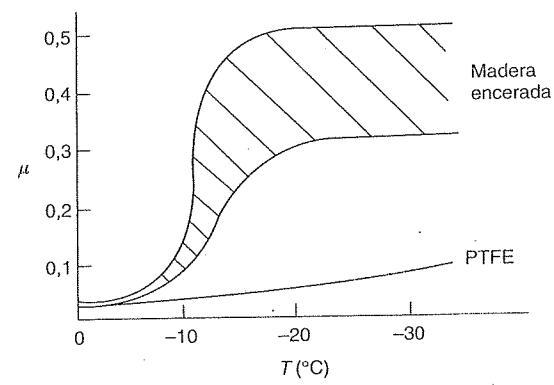


Figura 29.6 Rozamiento de materiales en hielo a varias temperaturas.

podrían despegar de las pistas cubiertas de nieve y el turismo de invierno en Suiza caería drásticamente. Por debajo de -10 °C empiezan a aparecer problemas (Figura 29.6):  $\mu$  aumenta bruscamente hasta alrededor de 0,4. Los exploradores polares lo observaron repetidas veces. Wright, un miembro de la expedición de Scott (1911-1913), escribió: "Por

debajo de 0 °F (-18 °C) la fricción (en los trineos) parecía aumentar progresivamente al disminuir la temperatura"; esto causó a la expedición considerables dificultades. ¿Qué determina la fricción de los esquís en la nieve?

El hielo difiere de la mayoría de los materiales en que su punto de fusión *disminuye* si se comprime. Es ampliamente admitido que la presión de los esquís provoca la fusión de la nieve bajo ellos, pero esto es absurdo: el peso de una persona corpulenta distribuido por los esquís disminuiría el punto de fusión alrededor de 0,0001 °C; incluso si consideramos que el peso es soportado por las asperezas del esquí, que tocan el hielo en sólo 10<sup>-3</sup> de su área nominal, el descenso del punto de fusión sería tan sólo de 0,1 °C. Por tanto, la fusión debida a la presión no puede ser una explicación para la baja fricción mostrada en la Figura 29.6. Sin embargo, cuando la persona corpulenta comienza a descender por la pista, se realiza trabajo contra las fuerzas de fricción, se genera calor en la superficie de deslizamiento y se excede la "velocidad límite" de la Figura 29.3. El calor funde la capa de hielo, produciendo una fina lámina de agua en los puntos en que las asperezas tocan el esquí. El esquiador patina sobre la capa de agua generada por fricción. El principio es exactamente igual al del cojinete de bronce al plomo, en el cual puntos calientes localizados funden el plomo produciendo una película lubricante de líquido que disminuye  $\mu$  y preserva el cojinete.

Por debajo de -10 °C el calor se extrae demasiado rápido como para permitir esta fusión y, debido a que su conductividad térmica es alta, los esquís con metal expuesto (bordes de aluminio o acero) son más lentos a bajas temperaturas que los que no lo tienen. A estas bajas temperaturas, el mecanismo de fricción es el mismo que el de los metales: las asperezas del hielo se adhieren al esquí y deben ser cizalladas durante el deslizamiento. El valor de  $\mu$  (0,4) es próximo al calculado con el modelo de cizalladura en el Capítulo 28. Es un valor elevado para el coeficiente de fricción; suficiente para hacer muy difícil el despegue de un avión y multiplica por un factor de más de 10 el trabajo necesario para tirar de un trineo cargado. ¿Qué se puede hacer para reducirlo?

Se trata de un problema estándar de rozamiento. En la Figura 28.5 se observa que cuando los polímeros se deslizan sobre metales y cerámicos,  $\mu$  puede ser tan bajo como 0,04. Entre los polímeros con los menores coeficientes de rozamiento están el PTFE ("Teflón") y el polietileno. Recubriendo el esquí o el trineo con estos materiales, el coeficiente de rozamiento permanecerá bajo incluso cuando la temperatura sea tan baja que el calor de fricción no sea suficiente para producir una lámina de agua. Hoy en día, los aviones y los esquís deportivos llevan suelas de polietileno o Teflón; el Comité Olímpico ha prohibido su uso en *bob-sleds*\*, pues algunos creen que ya van demasiado rápido.

29.4 Caso práctico 3: elastómeros de alta fricción

Hasta ahora hemos comentado algunos métodos para reducir la fricción, pero para muchas aplicaciones -pastillas de freno, guarniciones de embrague, botas de escalada y, sobre todo, neumáticos para coches- se desea tanta fricción como se pueda obtener.

El comportamiento a fricción de los elastómeros es bastante diferente del de los metales. En el Capítulo 28 vimos que cuando dos superficies metálicas se ponen en con-

\* Nota del traductor: trineo empleado en la modalidad olímpica del mismo nombre.

tacto bajo carga la deformación en los puntos de contacto es plástica, y que el rozamiento entre las superficies surge de las fuerzas necesarias para romper por cortadura las uniones en las zonas de contacto.

Pero los elastómeros se deforman *elásticamente* hasta valores muy elevados de deformación. Cuando ponemos en contacto un elastómero con otra superficie, la deformación en los puntos de contacto es *elástica*. Estas fuerzas elásticas aún son capaces de juntar los átomos en las áreas de contacto que darán lugar a adhesión, y se necesitarán fuerzas de cortadura para que las superficies se deslicen. Por esta razón los neumáticos tienen buena adherencia en seco. En ambiente húmedo la situación es diferente: se forma una fina película lubricante de agua y barro entre el neumático y la carretera, y la tensión cortante necesaria es bastante menor que en seco, con peligrosas consecuencias. En estas circunstancias, el mecanismo de fricción que interviene para ayudar a prevenir un derrape es diferente.

Este mecanismo se ilustra en la Figura 29.7. Todas las carreteras tienen una superficie bastante rugosa. Las crestas presionan el neumático causando deformaciones elásticas locales considerables. Cuando el neumático derrapa, se desliza sobre las rugosidades. La región de caucho que estaba deformada elásticamente por la cresta ahora se relaja, mientras que el caucho situado justo detrás de esa región se comprime. Ahora bien, todos los elastómeros presentan cierta *anelasticidad* (Capítulo 8), con curvas de tensión-deformación como la de la Figura 29.8. Al comprimirse el caucho se realiza un trabajo igual al área bajo la curva superior; al eliminar la tensión no se recupera todo ese trabajo, sino que parte de él se disipa en forma de calor —la zona sombreada entre las curvas de carga y descarga. Así pues, para que el neumático se mueva en una superficie rugosa hay que realizar trabajo, incluso aunque el neumático esté bien lubricado. Y si es necesario realizar un trabajo, existe fricción. Se han desarrollado elastómeros especiales que presentan altas pérdidas por disipación (llamados elastómeros de “alta pérdida” o “alta histéresis”), que presentan una excelente resistencia al derrape incluso en ambiente húmedo.

Los elastómeros de alta histéresis presentan una obvia desventaja. Durante la rodadura tienen lugar deformaciones elásticas considerables en la pared del neumático, consumen combustible y generan un calor considerable. La solución consiste en utilizar un neumático de bajas pérdidas cubierto con una banda exterior de altas pérdidas —éste es otro ejemplo de diseño utilizando materiales compuestos (Figura 29.9).

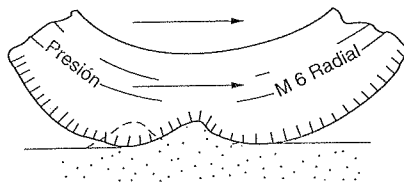


Figura 29.7 El derrape sobre una superficie rugosa deforma elásticamente el material del neumático.

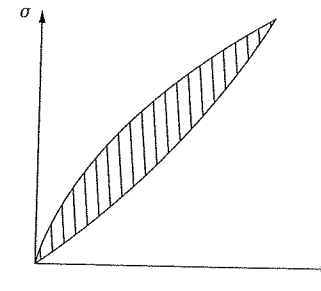


Figura 29.8 Durante un ciclo de carga y descarga elásticas en un elastómero se realiza trabajo.

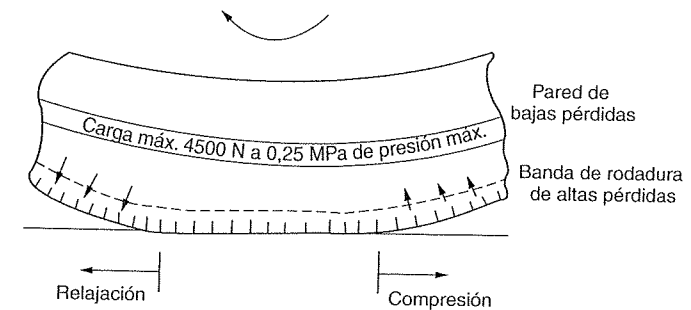


Figura 29.9 Neumáticos antiderrape, con una banda de rodadura de altas pérdidas (para máximo agarre) y una pared de bajas pérdidas (para mínimo calentamiento).

## Ejemplos

- 29.1** ¿De qué modo la lubricación reduce la fricción?
- 29.2** Se ha observado que en tejados con pendientes menores de  $24^\circ$  la nieve permanece estable, pero resbala y cae si la pendiente es mayor. Sin embargo, los esquiadores pueden deslizarse sobre una ladera cubierta de nieve con una pendiente de tan sólo  $2^\circ$ . ¿Por qué?
- 29.3** Una persona que pesa 100 kg desciende por una pendiente de  $2^\circ$  sobre unos esquís de 2 m de longitud y 0,10 m de ancho a  $0^\circ\text{C}$  de temperatura. Calcule la pérdida de energía potencial cuando el esquí se desliza una distancia igual a su longitud. Calcule el espesor medio de la película de agua debajo de cada esquí. (El calor latente de fusión del hielo es  $330\text{ MJ m}^{-3}$ .)

## Respuestas

Trabajo realizado 68 J; espesor medio de la película de agua =  $0,5\text{ }\mu\text{m}$ .

- 29.4** ¿Cómo puede mantenerse la fricción entre la carretera y el neumático, incluso bajo condiciones de apreciable lubricación?
- 29.5** En los países con inviernos muy fríos (por ejemplo Suecia) es habitual que los vehículos utilicen neumáticos especiales en los meses de invierno. Estos neumáticos tienen tacos de metal duro acoplados en la banda de rodadura. ¿Por qué son necesarios estos tacos?
- 29.6** Explicar el principio en que se basa la lubricación hidrodinámica. ¿Bajo qué condiciones es probable que falle? ¿Qué salva en ese caso al cojinete?
- 29.7** ¿Por qué los cojinetes ordinarios están formados normalmente por un eje endurecido que rueda dentro de una carcasa blanda?

## Parte I

# Diseñando con metales, cerámicos, polímeros y materiales compuestos