

Tribología en Diseño de Máquinas - Cojinetes



Alejandro Manuel Patricio Romero Mejía
Carrera de Ingeniería Mecatrónica, Escuela Militar de Ingeniera
La Paz, Bolivia

aromerom@doc.emi.edu.bo



Tribology in Machine Design – Bearings

Resumen- El propósito principal de este artículo es promover un mayor aprecio del papel cada vez más importante que desempeña la tribología en la etapa de diseño en ingeniería. Muestra cómo los algoritmos desarrollados a partir de los principios básicos de la tribología se pueden utilizar en una gama de aplicaciones prácticas.

El artículo se plantea como una referencia comprensiva y fuente que sea útil a los diseñadores practicantes, a los investigadores y a los estudiantes graduados. Es algo asombroso que, en la mayoría de los cursos de ingeniería mecánica, la tribología - o por lo menos la aplicación de la tribología al diseño de máquinas - no sea un tema obligatorio. Esto se puede tomar como causa importante del intervalo entre la publicación de nuevos resultados en tribología y su aplicación en la industria.

Los procedimientos y técnicas de análisis explicados brevemente en este artículo serán provechosos en la aplicación de los principios de tribología al diseño de los elementos de máquina que se encuentran comúnmente en dispositivos mecánicos y sistemas.

Palabras Claves— Cojinete, costo, desgaste, diseño, fricción, lubricación, película, presión, tribología, viscosidad.

Abstract - The main purpose of this article is to promote a better appreciation of the increasingly important role played by tribology at the design stage in engineering. It shows how algorithms developed from the basic principles of tribology can be used in a range of practical applications.

The article is planned as a comprehensive reference and source that will be useful to practicing designers, researchers and postgraduate students. It is rather surprising that, in most mechanical engineering courses, tribology – or at least application of tribology to machine design - is not a compulsory subject. This may be regarded as a major cause of the

time-lag between the publication of new findings in tribology and their application in industry.

The procedures and techniques of analysis explained in this book will be found helpful in applying the principles of tribology to the design of the machine elements commonly found in mechanical devices and systems.

Keywords— Cost, bearing, design, film, friction, lubrication, pressure, tribology, viscosity, wear.

I. INTRODUCCION

La palabra Tribología procede del griego tribos (frotamiento) y logos (estudio), por tanto, la Tribología es el estudio de la fricción.

El concepto de Tribología fue utilizado por primera vez en un informe elaborado por una Comisión del Ministerio de Educación y Ciencia de Gran Bretaña el 9 de marzo de 1966 hace 35 años, por lo que esta fecha se conoce como la del nacimiento de la Tribología como una nueva ciencia multidisciplinaria científica. Ya en ese informe se señalaba el carácter multidisciplinario de esta ciencia, en la que entre otras participa la física, la química, la economía, la ciencia de los materiales, la matemática y la computación.

Por tanto, la Tribología comenzó a reconocerse como fuente de un gran potencial para economizar recursos financieros, materias primas y materiales energéticos, de aquí su gran importancia, haciéndose efectiva por muchos países la estimulación de las investigaciones en la fricción, la lubricación y el desgaste.

Varios expertos consideran que, en 1990 en EE.UU., sólo por efectos de la fricción y el desgaste se gastó en energía una suma equivalente a la necesaria para mantener la ciudad de Nueva York durante un año. En la industria de construcción de maquinaria se estima que, entre el desgaste y la fatiga se produce el 90% de las causas de salida de servicio de los elementos de máquinas, no considerando aquí,

aquellos que estando desgastados continúan trabajando y son causa de pérdida de eficiencia en mecanismos y máquinas.

La prolongación de la vida útil de los componentes mecánicos por medio del control del desgaste se ha convertido durante la última década, en una importantísima herramienta para la reducción de los costos de producción en las industrias pesadas y medianas. El monitoreo del control del desgaste constituye ahora uno de los principales objetivos, tanto en el diseño mecánico como en las operaciones de mantenimiento. Siguiendo las necesidades prácticas, la investigación en ingeniería mecánica se ha dirigido hacia nuevas áreas de acción. Así además del análisis cinemático de las piezas en movimiento que ha sido el primer objetivo del diseño mecánico y del cálculo de resistencia de las piezas surgido con la evolución de los equipos de alta potencia.

El término tribología, aparte de su carácter colectivo que describe el campo de la fricción, lubricación y desgaste, se puede utilizar para acuñar un nuevo término tribodiseño. No debe ser pasado por alto, sin embargo, el término tribología no es inclusivo. De hecho, no incluye varias clases de desgaste mecánico tales como erosión, cavitación y otras formas de desgaste causadas por el flujo de materia.

En su forma más avanzada, el tribodiseño puede ser integrado en el diseño de máquinas al grado de llevar a la disposición más eficiente de varias clases de maquinaria. Por ejemplo, el uso de líquido de proceso como lubricante en los cojinetes de bombas y de turbocompresores, o la utilización de vapor de alta presión como lubricante para los cojinetes de una turbina de vapor.

La tarea de un ingeniero mecánico consiste en el control, por cualquier medio conveniente, el flujo de fuerza, energía y materia, incluyendo cualquier combinación e interacción de estas diversas clases de flujo. La conversión a partir de una forma de energía a otra puede también dar lugar a la energía cinética, que implica el movimiento. El movimiento es también esencial en la conversión de energía mecánica en energía térmica bajo la forma de calor friccional.

Costo de Fricción y Desgaste

El costo enorme de las deficiencias tribológicas en cualquier economía es causado sobre todo por la gran cantidad de pérdidas de energía y de material que ocurren simultáneamente en cada dispositivo mecánico en funcionamiento. Cuando están en base a

una sola máquina, las pérdidas son pequeñas. Sin embargo, cuando la misma pérdida se repite en quizás millones de máquinas de un tipo similar, los costos se hacen muy elevados.

En épocas más contemporáneas un análisis simple revela que suministrando a los impulsores de engranaje de gusano en los Estados Unidos un lubricante que permita un aumento relativo del 5% en la eficacia mecánica comparada a un aceite mineral convencional daría lugar a ahorros alrededor de 0.6 billones de dólares por año. El razonamiento es que hay 3 millones de engranajes tipo gusano que funcionan en los E.E.U.U. con un grado de energía media de cerca de 7.5 kW. Los ahorros nacionales anuales de la energía serían 9.8 billones kilovatios-hora y el valor correspondiente de esta energía es 0.6 billones de dólares y un costo de electricidad de 0.06 US\$ por kilovatio-hora.

De modo general, el desgaste puede ser controlado con eficacia seleccionando los materiales con las características específicas según lo ilustrado en el siguiente cuadro.

Critical material property	Wear mechanism							
	Abrasive	Erosive	Cavitation	Corrosive	Fretting	Adhesive	Molting	Fatigue
Hardness	✓	✓	○	○	○	✓	○	○
Toughness	○	✓	✓	○	○	○	○	✓
Fatigue resistance	✓	✓	✓	○	✓	○	○	✓
Inertness	○	○	○	✓	✓	○	○	○
High melting point	○	○	○	○	○	✓	✓	○
Heterogeneous microstructure	✓	○	○	■	○	✓	○	○
Non-metallic character	○	○	○	✓	○	✓	○	○

✓ Important ○ Fretting in air for metals
 ○ Marginal ■ Heterogeneous microstructure inhibits electrochemical corrosion and, with it, most forms of corrosive wear
 ■ Unfavorable

Guía de selección de materiales para control de desgaste

Problemas tribológicos en diseño de máquina

La tribología, en general, y el tribodiseño, en particular, son partes intrínsecas del diseño de máquinas y se pueden reforzar más a fondo con una breve revisión de los problemas tribológicos encontrados en los elementos de máquina más comunes.

Cojinetes de desplazamiento plano

Cuando un cojinete funciona en régimen hidrodinámico de lubricación, se desarrolla una película hidrodinámica. Bajo estas condiciones las superficies se separan completamente y un flujo copioso de lubricante se proporciona para evitar el recalentamiento. En estas circunstancias de completa separación, el desgaste mecánico no ocurre. Sin embargo, esta situación ideal no se alcanza siempre.

Por otra parte, el contacto puede ocurrir en el instante de inicio (antes de que la película hidrodinámica haya tenido la oportunidad de desarrollarse completamente), el cojinete puede ser sobrecargado de vez en cuando y las partículas extrañas pueden incorporarse al espacio de la película. En algunas aplicaciones, los motores de combustión interna, por ejemplo, los ácidos y otras sustancias corrosivas se pueden formar durante la combustión y transmitirse por el lubricante que induce un tipo de desgaste químico. En muchos casos, sin embargo, las partículas de materia extraña son responsables de la mayor parte del desgaste en situaciones prácticas. Lo más comúnmente posible, es que las partículas duras se atrapan entre el descanso y el cojinete. Las partículas se encajan a veces en la superficie del material más suave, como en el caso del metal blanco. Sin embargo, es corriente que las partículas duras se encajen en la superficie sustentadora, dando lugar a desgaste rápido en la superficie del eje. El cromado de los cojinetes del cigüeñal es a veces acertado en la lucha contra el desgaste abrasivo y corrosivo.

Pistón, anillos de pistón

Uno de los elementos de máquina más comunes es el pistón dentro de un cilindro que forma normalmente parte de un motor, aunque arreglos similares también se encuentran en bombas, motores hidráulicos, compresores de gas y ventiladores. La función principal de un pistón es actuar como un sello y contrapesar la acción de las fuerzas que actúan sobre el eje del pistón. En la mayoría de casos la acción de sellado es alcanzada por el uso de anillos de émbolo, aunque éstos se omiten a veces en maquinaria hidráulica.

Los pistones se lubrican normalmente, aunque en algunos casos, como en la industria química, los anillos de émbolo se proporcionan para funcionar sin lubricación. En muchos casos el diseño debe ser un compromiso, porque una lubricación muy eficaz del pistón podría llevar a un alto consumo de aceite en un motor de combustión interna.

II. CONTENIDO

A. Etapa de Revisión

El propósito de la lubricación es la separación de dos superficies con deslizamiento relativo entre sí de tal manera que no se produzca daño en ellas: se intenta con ello que el proceso de deslizamiento sea con el rozamiento más pequeño posible. Para conseguir esto se intenta, siempre que sea posible, que haya una película de lubricante (gaseoso, líquido o sólido) de espesor suficiente entre las dos superficies en contacto para evitar el desgaste.

El lubricante en la mayoría de los casos es aceite mineral. En algunos casos se utiliza agua, aire o lubricantes sintéticos cuando hay condiciones especiales de temperatura, velocidad, etc.

Históricamente es interesante señalar que únicamente con la mejora de los procesos de fabricación de elementos metálicos (a partir de la revolución industrial) y el aumento de las velocidades de giro de ejes y elementos rodantes se ha podido obtener los valores de disponibilidad que actualmente tenemos con ellos.

B. Tipos de lubricación

Lubricación hidrodinámica:

Las superficies están separadas por una película de lubricante que proporciona estabilidad. No se basa en introducir lubricante a presión (puede hacerse), exige un caudal de aceite, la presión se genera por movimiento relativo. Se habla también de lubricación de película gruesa, fluida, completa o perfecta.

Lubricación límite:

La película de lubricante es tan fina que existe un contacto parcial metal-metal. La acción resultante no se explica por la hidrodinámica.

Puede pasarse de lubricación hidrodinámica a límite por caída de la velocidad, aumento de la carga o disminución del caudal de aceite. En este tipo de lubricación (de película delgada, imperfecta o parcial) más que la viscosidad del lubricante es más importante la composición química. Al proyectar un cojinete hidrodinámico hay que tener en cuenta que en el arranque puede funcionar en condiciones de lubricación límite.

Lubricación hidrostática:

Se obtiene introduciendo a presión el lubricante en la zona de carga para crear una película de lubricante. – no es necesario el movimiento relativo entre las superficies. – se emplea en cojinetes lentos con grandes cargas. – puede emplearse aire o agua como lubricante.

Lubricación Elastohidrodinámica (EHL)

La definición de la lubricación Elastohidrodinámica se puede explicar así: Elasto: elasticidad, o sea que la cresta de la irregularidad en el momento de la interacción con la cresta de la otra superficie se deforma elásticamente sin llegar al punto de fluencia del material; Hidrodinámica, ya que una vez que ocurre la deformación elástica la película de aceite que queda atrapada entre las rugosidades forma una película hidrodinámica de un tamaño microscópico mucho menor que el que forma una película hidrodinámica propiamente dicha.

Lubricación Marginal

En la lubricación marginal los sólidos no están separados por el lubricante, los efectos de la película fluida son insignificantes y existe un contacto de las asperezas importante. El mecanismo de lubricación por contacto se rige por las propiedades físicas y químicas de las películas delgadas de superficie de proporciones moleculares. Las propiedades volumétricas del lubricante tienen menor importancia y el coeficiente de fricción es esencialmente independiente de la viscosidad del fluido. Las propiedades de los sólidos y la película del lubricante en las interfaces comunes determinan las características de la fricción. A medida que se incrementa la carga relativa en el régimen no lubricado la tasa de desgaste se incrementa hasta que se presentan estrías o cuando ocurre el agarrotamiento y el elemento de máquina ya no opera adecuadamente. La mayoría de las máquinas no operan por mucho tiempo sin alguna lubricación con la consecuencia inmediata de una falla de los elementos involucrados.

La lubricación marginal se utiliza en los elementos de máquinas con cargas pesadas y bajas velocidades de operación, donde es difícil obtener una lubricación por película fluida. Como ejemplo clásico tenemos el funcionamiento de las bisagras de las puertas que utilizan esta lubricación.

Lubricación Mixta

La gráfica generada por un rugosímetro muestra una línea media de referencia. Este sistema se basa en la selección de la línea media como centroide del perfil. De esta forma las áreas por encima y debajo de esta línea son iguales, de manera que el promedio es cero. Es una condición intermedia entre las películas límite e hidrodinámica, en la cual un buen porcentaje de las crestas de las dos superficies interactúan presentándose la película límite y otras ya están separadas en las cuales la película límite no desempeña ninguna labor. En lubricación mixta el desgaste y el consumo de energía dependen tanto de las características de la película límite como de la resistencia a la cizalladura de la película fluida y de su estabilidad.

Es importante reconocer que la transición de la lubricación hidrodinámica a la mixta no ocurre instantáneamente a medida que la severidad de la carga se incrementa, sino que las presiones dentro del fluido que llena el espacio entre los sólidos opuestos soportan una proporción decreciente de la carga. A

medida que ésta se incrementa, la mayor parte la soporta la presión de contacto entre las asperezas de los sólidos. Además, el régimen de lubricación para superficies concordantes va directamente de la lubricación hidrodinámica a la mixta.

C. Tribología productiva

Desafortunadamente la mayoría de las empresas industriales aún siguen empeñadas en llevar a cabo sus programas de lubricación de manera sistemática y no proactiva lo cual como es obvio conduce a altos costos de lubricación, de mantenimiento y a baja confiabilidad de los equipos rotativos. Mediante la aplicación de la Tribología estamos de por sí al alcance de llegar al diseño por fatiga de las máquinas e incluso que en algunos casos estos puedan ser superados. Para obtener estos resultados debemos interactuar con otras ciencias y ramas del mantenimiento proactivo y preventivo, entonces nos dirigiremos hacia una Tribología Productiva que involucrara como pilares fundamentales:

El control de la fricción y la reducción del desgaste

La aplicación de la Tribología debe conducir a reducir al máximo la fricción sólida, fluida y elastohidrodinámica (EHL) y a evitar que se presente la fricción metal - metal; si se controla la fricción será posible reducir los diferentes tipos de desgaste que se pueden presentar en un mecanismo permitiendo que éste alcance su vida a la fatiga e inclusive la incremente. El mantenimiento proactivo mediante un buen programa vibracional y de balanceo, conjuntamente el uso de lubricantes de buena calidad asegurará la preservación de los activos.

El desgaste en sus distintas formas es sinónimo de improductividad y se define como la pérdida de material entre dos superficies que se encuentran en movimiento relativo y que se manifiesta por un funcionamiento errático apenas perceptible, siendo necesario en la mayoría de los casos sacar de servicio el equipo del cual hacen parte fundamental. Las causas del desgaste siempre pueden ser determinadas a partir de la implementación de programas de mantenimiento proactivo efectivos. Esto con seguridad no retornará una satisfacción profesional y económica en adelante.

El desgaste, cualquiera que sea su origen siempre conduce al contacto metal-metal entre las superficies del mecanismo que se encuentran en movimiento relativo y se define como el deterioro sufrido por ellas a causa de la intensidad de la interacción de sus rugosidades superficiales; este tipo de desgaste puede llegar a ser crítico haciendo que las piezas de una

máquina pierdan sus tolerancias y el mecanismo funcione de una manera errática o que fallen catastróficamente quedando inservibles y causando consecuentemente costosos daños y elevadas pérdidas en el sistema productivo de la empresa. Si se quiere que las máquinas alcancen sus mayores índices de productividad es necesario lograr que los componentes que las constituyen se cambien por fatiga y no por alguno de los muchos tipos de desgaste que se pueden presentar durante su explotación.

Una superficie lubricada se puede desgastar por causas que pueden ser intrínsecas al tipo de lubricante utilizado, a su tiempo de servicio, a contaminantes presentes en el aceite cuyo origen puede ser de los mismos mecanismos lubricados o de fuentes externas, a fallas intempestivas del sistema de lubricación y en algunos pocos casos como resultado de una selección incorrecta del equipo para el tipo de trabajo que va a desarrollar, a un mal diseño o al empleo de materiales inadecuados para las condiciones de operación de los mecanismos que lo constituyen. Las superficies correctamente lubricadas también se desgastan cuando se desgasta o se rompe la película límite en el caso de la lubricación límite ó elastohidrodinámica (EHL) y se conoce como desgaste adhesivo o del desprendimiento de dicha película de las rugosidades de las superficies metálicas cuando se tienen condiciones de lubricación fluida.

El ahorro de energía

Cualquier sustancia que se utilice como lubricante reduce la fricción en algún grado y por lo tanto el esfuerzo para mover los diferentes mecanismos de una máquina, sin embargo, al aplicar la Tribología la filosofía debe ser la de utilizar lubricantes con los coeficientes de fricción lo más bajos posibles de tal manera que el consumo de energía sea mínimo. Quizá más importante aún es la calidad de los mismos pues a partir de una mejor calidad existirá más cuidado a equipos y maquinaria, no podemos esperar un máximo ahorro energético a partir de lubricantes de baja calidad. Es muy importante pues a la hora de adquirir un nuevo lubricante conocer sus especificaciones técnicas y la base a partir de la cual fue hecho. El proceso por el cual son fabricados es otro punto a tomar en cuenta, pues esto determinará la estabilidad en el tiempo de trabajo al cual será sometido.

Sin conocer estas características no es posible implementar programas de ahorro energético mediante un control de la fricción.

La conservación del medio ambiente y la preservación de los recursos no renovables

En la lubricación de los mecanismos de una

máquina se debe tener siempre presente la conservación del medio ambiente y la preservación de los recursos no renovables como el petróleo, por tanto, se debe racionalizar el consumo de lubricantes.

Cabe recordar que al utilizar lubricantes derivados del petróleo estos se oxidan y dan lugar a la formación de peróxidos y ácido sulfúrico, lo que hace que estos lubricantes sean altamente tóxicos y no biodegradables, conllevando a un envenenamiento paulatino de la tierra y el medio ambiente.

Los factores que favorecen el desgaste de piezas mecánicas son:

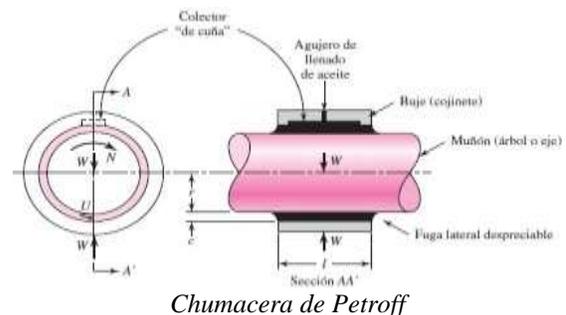
- Mal diseño de elementos mecánicos
- Utilización de materiales no adecuados
- Poca o ninguna utilización de lubricantes adecuados
- Desconocimiento del fenómeno
- Desconocimiento de las condiciones del lugar de trabajo.

D. Procedimiento.

Una vez realizada la consulta bibliográfica correspondiente, se determina que se debe conocer la ecuación de Petroff.

El fenómeno de la fricción en cojinetes lo explicó primero Petroff mediante el supuesto de que el árbol es concéntrico. Es importante porque define grupos de parámetros adimensionales y porque el coeficiente de fricción predicho mediante esta ley resulta ser muy exacto, incluso con árboles no concéntricos.

Ahora se considera un árbol vertical que gira en un cojinete guía. Se supone que el cojinete soporta una carga muy pequeña, que el espacio de holgura se encuentra por completo lleno de aceite y que las fugas son despreciables (ver figura).



El radio del árbol se denota por r , la holgura radial por c y la longitud del cojinete por l , y todas las dimensiones están en pulgadas. Si el árbol gira a N rps, entonces su velocidad en la superficie es $U = 2\pi rN$ pulg/s.

Como el esfuerzo cortante en el lubricante es igual al gradiente de la velocidad por la viscosidad, se deduce que

$$\tau = \mu \frac{U}{h} = \frac{2\pi r \mu N}{c}$$

La fuerza que se requiere para cortar la película es el esfuerzo por el área. El par de torsión corresponde a la fuerza por el brazo de palanca r . Así,

$$T = (\tau A)r = \left(\frac{2\pi r \mu N}{c}\right)(2\pi r l)r = \frac{4\pi^2 r^3 l \mu N}{c}$$

Si ahora se designa una fuerza pequeña en el cojinete por W , en libras fuerza, entonces la presión P , en libras fuerza por pulgada cuadrada de área proyectada, es $P = W/2rl$. La fuerza de fricción se denota por fW , donde f representa el coeficiente de fricción, por lo cual el par de torsión friccional se determina mediante

$$T = fWr = f(2rlP)r = 2r^2 f l P$$

Sustituyendo el valor del par de torsión en la ecuación anterior y despejando el coeficiente de fricción, se tiene

$$f = 2\pi^2 \frac{\mu N}{P} \frac{r}{c}$$

La expresión anterior se llama *ecuación de Petroff* y se publicó por primera ocasión en 1883. Las dos cantidades $\mu N/P$ y r/c representan parámetros muy importantes en la lubricación. La sustitución de las dimensiones apropiadas en cada parámetro demostrará que son adimensionales.

El *número característico del cojinete* o *número de Sommerfeld* se define por la ecuación

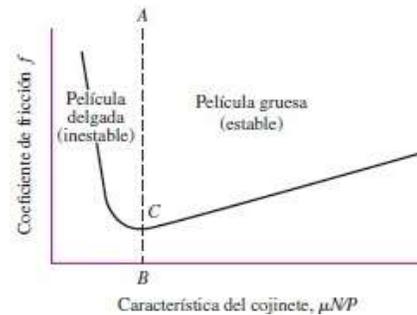
$$S = \left(\frac{r}{c}\right)^2 \frac{\mu N}{P}$$

El número de Sommerfeld es muy importante en el análisis de la lubricación, porque contiene muchos parámetros especificados por el diseñador. Además, es adimensional. La cantidad r/c se conoce como *relación de holgura radial*. Si se multiplican ambos lados de la ecuación para f por esta cantidad, se obtiene la interesante relación

$$f \frac{r}{c} = 2\pi^2 \frac{\mu N}{P} \left(\frac{r}{c}\right)^2 = 2\pi^2 S$$

Lubricación estable

La diferencia entre lubricación límite e hidrodinámica se explica remitiéndose a la siguiente figura.



Variación del coeficiente de fricción

La gráfica del cambio de coeficiente de fricción contra la característica del cojinete $\mu N/P$ fue elaborada por los hermanos McKee en un ensayo real de la fricción. La gráfica resulta importante porque define la estabilidad de la lubricación y ayuda a comprender la lubricación hidrodinámica y límite, o de película delgada.

Si se recuerda, el modelo del cojinete de Petroff en la forma de su ecuación, ésta predice que f es proporcional a $\mu N/P$, es decir, una línea recta desde el origen en el primer cuadrante.

Un ejemplo son las coordenadas de la figura anterior en el sitio a la derecha del punto C. El modelo de Petroff supone la lubricación de película gruesa, esto es, que no hay contacto entre metal y metal, con las superficies completamente separadas por medio de una película de lubricante. La abscisa de McKee fue ZN/P (centipoise \times rpm/psi) y el valor de la abscisa B en la figura fue 30. La $\mu N/P$ (reyn \times rps/psi) correspondiente es $0,33(10^{-6})$. Los diseñadores mantienen $\mu N/P \geq 1,7(10^{-6})$, lo cual corresponde a $ZN/P \geq 150$. Una restricción de diseño para conservar la lubricación de película gruesa es asegurar que

$$\mu N/P \geq 1,7 \times 10^{-6}$$

Supóngase que se opera a la derecha de la recta BA y algo sucede, por decir, un incremento de la temperatura del lubricante. Lo anterior resulta en una menor viscosidad, por lo cual se da un valor menor de $\mu N/P$. El coeficiente de fricción decrece, no se genera tanto calor en el corte del lubricante y por consiguiente su temperatura disminuye. De esta forma, la región a la derecha de la recta BA define la lubricación estable porque las variaciones se autocorrijen.

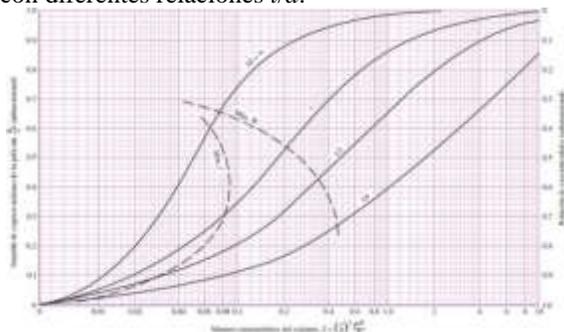
A la izquierda de la recta BA, una disminución de la viscosidad incrementaría la fricción. Se originaría un aumento de la temperatura y la viscosidad se reduciría todavía más. El resultado sería mixto. De esta manera, la región hacia la izquierda de BA representa una lubricación inestable.

También es útil saber que una viscosidad pequeña, y por lo tanto una $\mu N/P$ pequeña, significa que la película de lubricante es muy delgada de manera que existe una mayor posibilidad de algún contacto de metal con metal y, por ende, habrá más fricción.

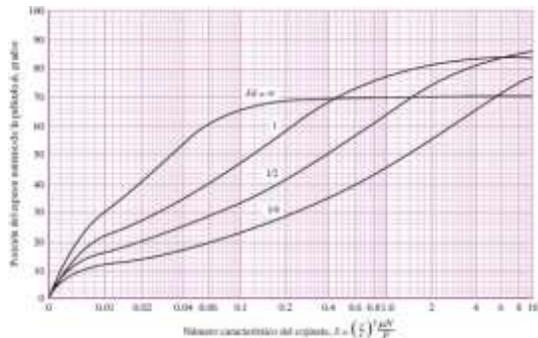
Por ello, el punto C representa lo que probablemente es el inicio del contacto de metal con metal a medida que $\mu N/P$ se hace más pequeña.

Espesor mínimo de película

En la siguiente figura, la variable de espesor mínimo de película h_o/c y la relación de excentricidad $\epsilon = e/c$ se grafican contra el número de Sommerfeld S con diferentes relaciones l/d .



La correspondiente posición angular del espesor mínimo de película se encuentra en la siguiente figura.



III. CONCLUSIONES

En las industrias es muy importante contar con un método donde se genere ahorro, y claro porque no con la maquinaria que convierte nuestra materia prima en un producto terminado, con ello se puede concluir que la competencia a nuevas ideologías que generen ahorros a una empresa siempre las puertas estarán abiertas.

El propósito de la lubricación consiste en reducir la fricción, el desgaste y el calentamiento de elementos de máquinas, que se mueven uno con respecto al otro. En un cojinete antifricción, el movimiento relativo principal es rodante. Un seguidor puede rodar o deslizarse sobre la leva.

Los pistones se deslizan dentro de sus cilindros. Todas estas aplicaciones requieren de lubricación

para reducir la fricción, el desgaste y el calentamiento.

El campo de aplicación de las chumaceras es inmenso. El cigüeñal y los cojinetes de las bielas de un motor de automóvil deben funcionar durante miles de kilómetros a altas temperaturas y bajo condiciones de carga variables.

Por otra parte, hay miles de aplicaciones en las cuales las cargas son ligeras y el servicio relativamente de poca importancia; se requiere entonces de un cojinete simple que se pueda instalar fácilmente, que haga uso de poca o ninguna lubricación. En esos casos, un cojinete antifricción quizás sea una respuesta inadecuada debido al costo, a los alojamientos complicados, a las tolerancias estrictas, al espacio radial que se requiere, a las altas velocidades o a los efectos de inercia incrementados.

En la actualidad, los recientes desarrollos metalúrgicos en materiales para cojinetes, combinados con un mayor conocimiento del proceso de lubricación permiten diseñar chumaceras con vidas satisfactorias y confiabilidades muy buenas.

Gran parte del contenido de este artículo se basa en estudios fundamentales de ingeniería, como estática, dinámica, mecánica de sólidos, procesamiento de metales, matemáticas y metalurgia.

En forma personal puedo decir que hay mucho donde aprender y mucho donde perder si no se actualiza uno con el avance de la tecnología y los sistemas numéricos.

REFERENCES

- [1] G. Stachowiak, *Engineering Tribology*. Elsevier, 2014, ch. 3, ch. 4.
- [2] A. Stolarski, *Tribology in Machine Design*, Butterworth-Heinemann, 1990, ch. 6, ch. 7.
- [3] O. Linares, *Tribología y Mantenimiento Proactivo (Fundamentos de la lubricación, fricción y el desgaste)*, *Widman International S.R.L.*
- [4] P. Davim, *Tribology for Engineers, A Practical Guide*.
- [5] R. Bassani, *Hidrotatic Lubrication*. Elsevier, 1992, ch. 4.
- [6] B. Bhushan, *Principles and Applications of Tribology*. Wiley, 2013, ch. 8, ch. 9.
- [7] M. Khonsari, *Applied Tribology*. Wiley, 2017, ch. 15.
- [8] S. Wen, *Principles of Tribology*. Wiley, 2018, ch. 4.

Biografía Autor



Docente, en la Escuela Militar de Ingeniería, en las carreras de Ingeniería Industrial y Mecatrónica. Docente en la Universidad Mayor de San Andrés, en la carrera de Ingeniería Mecánica y Electromecánica. Ingeniero Mecánico, Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Ingeniería, La Paz, Bolivia.

Docente en la EMI desde el año 2008, docente en la UMSA desde el año 2010. El autor es CONSULTOR en la empresa Web-Bolivia desde el año 2008 y actualmente en Gas Energy Services Ltda, desarrollando proyectos de cálculo y diseño.

Ing. Romero.

Fecha de Envío del Artículo: La Paz, 15 de octubre de 2022

Fecha de Recepción de artículo: La Paz, 15 de octubre de 2022