

TRIBOLOGÍA Y MANTENIMIENTO PROACTIVO

CAPÍTULO 1

Generalidades de la Tribologia

Fundamentos de la Lubricación, Fricción y el Desgaste

**Ing. Omar Linares O.
Widman International S.R.L.
Santa Cruz, Bolivia**

Fundamentos de la Tribología

1.1 Historia y antecedentes

La Tribología podría parecer algo nuevo, pero es solo la percepción, solamente el término como tal lo es, ya que el interés en temas relacionados con la disciplina existe desde antes de que la historia se escribiera. Como un ejemplo, se sabe que las “brocas” realizadas durante el periodo Paleolítico para perforar agujeros o para producir fuego, eran “fijados” con rodamientos hechos de cornamentas o huesos.

Los documentos históricos muestran el uso de la rueda desde el 3500 A.C., lo cual ilustra el interés de nuestros antepasados por reducir la fricción en movimientos de traslación. Los egipcios tenían el conocimiento de la fricción y los lubricantes, esto se ve en el transporte de grandes bloques de piedra para la construcción de monumentos y pirámides. Para realizar esta tarea utilizaban agua o grasa animal como lubricante.

El artista científico renacentista Leonardo Da Vinci fue el primero que postuló un acercamiento a la fricción. Da Vinci dedujo la leyes que gobernaban el movimiento de un bloque rectangular deslizándose sobre una superficie plana, también, fue el primero en introducir el concepto del coeficiente de fricción. Desafortunadamente sus escritos no fueron publicados hasta cientos de años después de sus descubrimientos. Fue en 1699 que el físico francés Guillaume Amontons redescubrió las leyes de la fricción al estudiar el deslizamiento entre dos superficies planas.

Muchos otros descubrimientos ocurrieron a lo largo de la historia referentes al tema, científicos como Charles Augustin Coulomb, Robert Hooke, Isaac Newton, entre otros, aportaron conocimientos importantes para el desarrollo de esta ciencia.

Al surgir la Revolución Industrial el desarrollo tecnológico de la maquinaria para producción avanzó rápidamente. El uso de la potencia del vapor permitió nuevas técnicas de manufactura. En los inicios del siglo veinte, desde el enorme crecimiento industrial hasta la demanda de una mejor tribología, el conocimiento de todas las áreas de la tribología se expandió rápidamente

La tribología es la ciencia y tecnología que estudia la **lubricación, la fricción y el desgaste** de partes móviles o estacionarias. La lubricación, la fricción y el desgaste tienen una función fundamental en la vida de los elementos de maquinas.

El termino tribología viene del termino griego **tribos**, que significa frotamiento o rozamiento y **logía** que viene a ser ciencia, por tanto la traducción literal será “**la ciencia del frotamiento**”.

La mayoría de las consecuencias de la fricción y el desgaste se consideran negativas, tales como el consumo de energía y la causa de las fallas mecánicas, sin embargo existen beneficios fundamentales de la fricción y el desgaste. La interacción neumático y el piso por ejemplo o el zapato y el suelo, sin los cuales trasladarse seria imposible.

La fricción sirve como el mecanismo de conexión inherente en los nudos, los clavos y el conjunto tuerca tornillo.

El esfuerzo de diseño no solo debe ser menor que el esfuerzo permisible y la deformación no debe exceder ningún valor máximo, sino que la lubricación, la fricción y el desgaste (consideraciones tribológicas) también deben ser apropiadamente comprendidas para que los elementos de maquinas se diseñen con éxito.

Es reconocida como fuente de gran potencial para economizar recursos financieros además de la preservación de activos físicos, materias primas y recursos energéticos. También como una ineludible forma de hacer Mantenimiento Proactivo en equipos y maquinarias.

Como en la resistencia de materiales, la tribología es la base para cada diseño de ingeniería de elementos de maquinas. Casi ningún elemento de maquina no depende de consideraciones tribológicas.

Dentro de los tres grupos inherentes que comprende trataremos inicialmente de la lubricación que es el que justamente nos interesa mas, en otras palabras como tratar los efectos que produce la fricción, el desgaste y en consecuencia el remedio es una visión proactiva hacia una lubricación racional y efectiva.

1.2 Lubricación

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.

1.3 Objetivos y campos de aplicación

El objetivo de la lubricación es reducir el rozamiento, el desgaste y el calentamiento de las superficies en contacto de piezas con movimiento relativo.

La aplicación típica en ingeniería mecánica es el cojinete, constituido por muñón o eje, manguito o cojinete.

Campos de aplicación:

- cojinetes del cigüeñal y bielas de un motor (vida de miles de Km.).
- cojinetes de turbinas de centrales (fiabilidad del 100%).

Los factores a considerar en diseño son técnicos y económicos:

- cargas aplicadas y condiciones de servicio.
- condiciones de instalación y posibilidad de mantenimiento.
- tolerancias de fabricación y funcionamiento; vida exigida y vida útil.
- costos de instalación y mantenimiento.

La lubricación por película fluida ocurre cuando dos superficies opuestas se separan completamente por una película lubricante y ninguna aspereza está en contacto. La presión generada dentro el fluido soporta la carga aplicada, y la resistencia por fricción al movimiento se origina completamente del cortante del fluido viscoso.

El espesor de la película lubricante depende en gran parte de la viscosidad del lubricante tanto en el extremo alto como bajo de la temperatura.

1.4 Superficies Concordantes

Las superficies concordantes se ajustan bastante bien una con otra con un alto grado de conformidad geométrica, de manera que la carga se transfiere a un área relativamente grande.

Por ejemplo el área de lubricación para una chumacera será de 2π por el radio por la longitud.

El área de la superficie que soporta una carga permanente generalmente constante mientras la carga se incrementa.

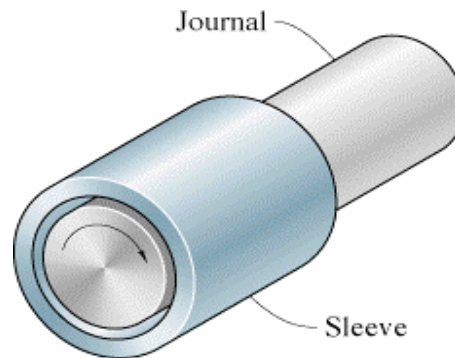


Fig. 1 Chumacera y manguito

La chumacera con lubricación de película fluida representada en la figura 1 y los cojinetes deslizantes tienen superficies concordantes. En las chumaceras la holgura radial entre el cojinete y el manguito es por lo general la milésima parte del diámetro del cojinete; en los cojinetes deslizantes la inclinación de la superficie de estos respecto al rodillo de rodadura suele ser muy rara. Un ejemplo de superficie concordante es la junta de la cadera del ser humano.

1.5 Superficies no Concordantes

Muchos elementos de maquinas lubricados por una película fluida tienen superficies que no concuerdan entre si. Entonces un área pequeña de lubricación debe soportar todo el peso de la carga.

Por lo general el área de lubricación de una conjunción no concordante es 3 veces menor que la magnitud que la de una superficie concordante.

El área de lubricación entre superficies no concordantes se agranda bastante con el incremento de carga; pero aun así es más pequeña que el área de la lubricación entre las superficies concordantes.

Ejemplos de superficies no concordantes son el acoplamiento de los dientes de un engranaje, el contacto entre levas y seguidores, y también los cojinetes de elementos rodantes.

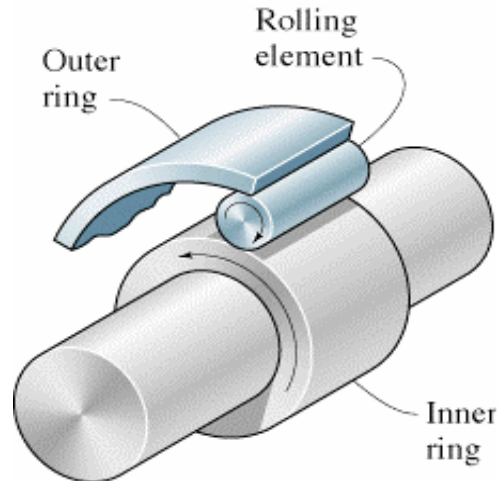


Fig. 2 Representación de superficies no concordantes

1.6 Tipos de lubricación, Lubricación Hidrodinámica

Tenemos cuatro tipos básicos de lubricación y estos se desarrollan a continuación. La lubricación hidrodinámica se caracteriza en superficies concordantes con una lubricación por película fluida. En este tipo de lubricación las películas son gruesas de manera que se previene que las superficies sólidas opuestas entren en contacto. Con frecuencia se la llama *la forma ideal de lubricación*, porque proporciona baja fricción y alta resistencia al desgaste.

La lubricación de las superficies sólidas se rige por las propiedades físicas del volumen del lubricante, especialmente de la viscosidad; por otra parte, las características de fricción se originan puramente del cortante del lubricante viscoso.

Una presión positiva se desarrolla en una chumacera o en un cojinete de empuje lubricados ambos hidrodinámicamente, porque las superficies del cojinete convergen, y su movimiento

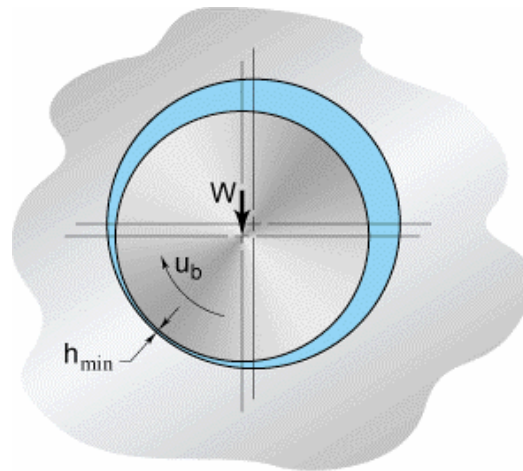
relativo y la viscosidad del fluido separan las superficies. La existencia de una presión positiva implica que se soporta la aplicación de una carga normal.

Generalmente la magnitud de la presión que se desarrolla es menor que 5 Mpa y no es lo suficientemente grande para causar una deformación elástica significativa en las superficies.

En un cojinete lubricado hidrodinámicamente el espesor mínimo de la película es función de la carga normal que se aplica W , de la velocidad u_b , de la viscosidad absoluta del lubricante η_0 y de la geometría (R_x y R_y). En la figura 3 se representa características de la lubricación hidrodinámica. El espesor mínimo de película h_{min} como una función u_b y W para el movimiento deslizante se obtiene mediante la ecuación 1:

Donde el espesor mínimo de la película normalmente excede $1 \mu m$.

$$(h_{min}) \approx (u_b / W)^{1/2} \quad \text{Ec. 1}$$



Conformal surfaces
 $p_{max} \approx 5 \text{ MPa}$
 $h_{min} = f(W, u_b, \eta_0, R_x, R_y) > 1 \mu m$
 No elastic effect

Fig. 3 Lubricación hidrodinámica

1.6.1 Lubricación Elastohidrodinámica (EHL)

Este es un tipo de lubricación que desde su descubrimiento por los profesores británicos Dowson Duncan y Higginson Gordon en la década de los años 50's marcó el verdadero comienzo a la solución de los problemas de desgaste en mecanismos que funcionaban sometidos a condiciones de altas cargas y bajas velocidades y que hasta entonces se manejaban como mecanismos lubricados por película límite ó fluida. La lubricación EHL se presenta en mecanismos en los cuales las rugosidades de las superficies de fricción trabajan siempre entrelazadas y nunca llegan a separarse. En este caso las crestas permanentemente se están deformando elásticamente y el control del desgaste y el consumo de energía depende de la película adherida a las rugosidades. Se podría denominar esta película como límite pero de

unas características de soporte de carga y de resistencia al desgaste mucho más elevadas que las que forma la película límite propiamente dicha. En la lubricación EHL la lubricación límite es permanente, ó sea que no hay mucha diferencia entre las condiciones de lubricación en el momento de la puesta en marcha del mecanismo y una vez que este alcanza la velocidad nominal de operación.

La definición de la lubricación Elastohidrodinámica se puede explicar así: **Elasto:** elasticidad, ó 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. En la lubricación hidrodinámica el espesor de la película lubricante puede ser del orden de 5 μm en adelante, mientras que en la EHL de 1 μm ó menos. Normalmente esta lubricación esta asociada con superficies no concordantes y con la lubricación por película fluida.

1.7 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.

El espesor de las películas de superficie varia entre 1 y 10 nm, dependiendo del tamaño molecular.

La Fig. 4 ilustra las condiciones de película fluida en la lubricación marginal. Las pendientes de la superficie y los espesores de la película se encuentran magnificados por fines didácticos.

En la Fig. 5 se muestra el comportamiento del coeficiente de fricción en los diferentes regimenes de lubricación. El coeficiente de fricción medio se incrementa hasta un total de tres veces mas al pasar del régimen hidrodinámico, al elastohidrodinámico, al marginal y al sin lubricación.

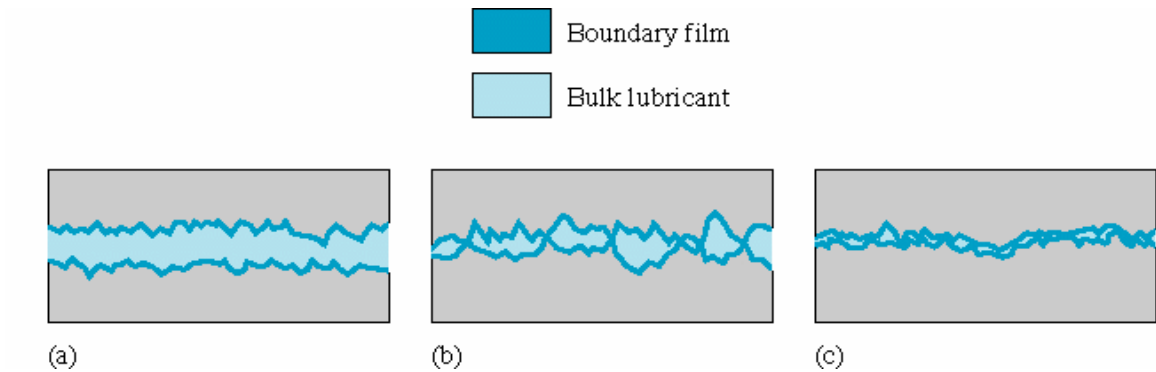


Fig. 4 Condiciones de película que se requieren para la lubricación a) lubricación por película fluida: superficies separadas por la masa principal de la película lubricante; b) lubricación mixta; tanto la masa principal del lubricante como la película marginal tienen una función; c) lubricación marginal: el desempeño depende esencialmente de la película marginal.

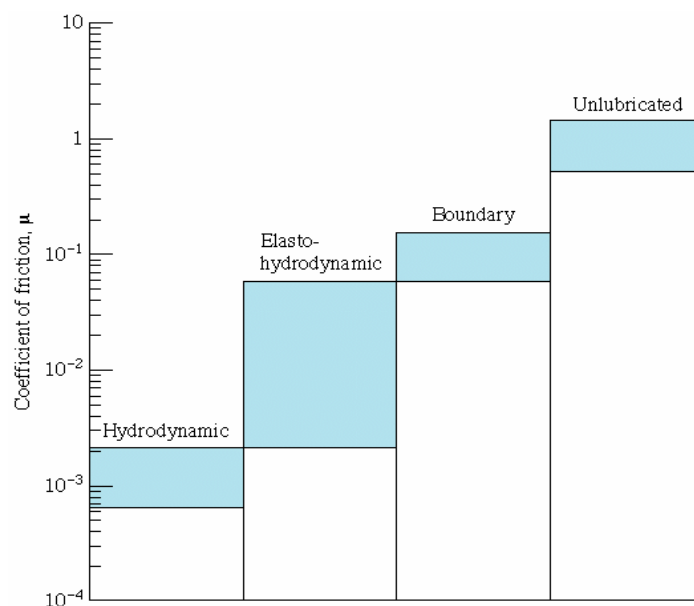


Fig. 5 Diagrama de barras que muestra los coeficientes de fricción para varias condiciones de lubricación

La Fig. 6 muestra la tasa de desgaste en los varios regimenes de lubricación determinada por la carga de operación. En los regimenes hidrodinámicos y elastohidrodinámicos existe poco o ningún desgaste pues no hay contacto de asperezas. En el régimen de lubricación marginal, el grado de interacción de asperezas y la tasa de desgaste se incrementan a medida que la carga aumenta. La transición de lubricación marginal a una condición no lubricada se distingue por un cambio drástico en la tasa de desgaste.

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 maquina ya no opera adecuadamente. La mayoría de las maquinas 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 maquinas 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.

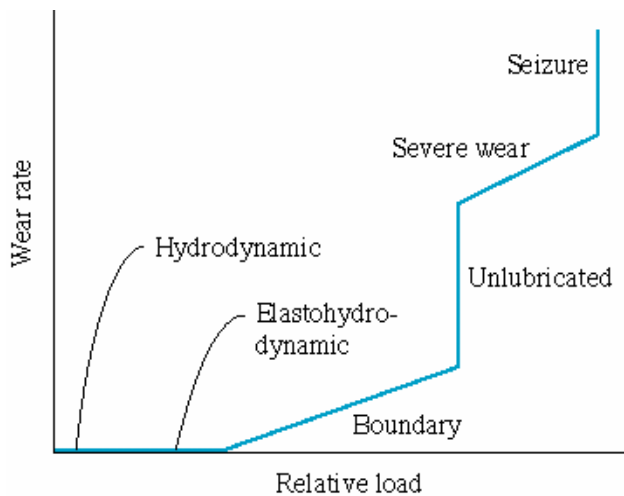


Fig. 6 Rapidez del desgaste para varios regimenes de lubricación

1.8 Lubricación Mixta

La grafica generada por un rugosímetro tal como lo muestra la Fig. 7 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 z_i 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 (IV).

Si las presiones en los elementos de maquinas lubricados resultan ser demasiado altas (alta carga) o las velocidades de operación son demasiado bajas, la película del lubricante se dispersa; existe algún contacto entre asperezas y entonces ocurre este tipo de lubricación. El comportamiento de la conjunción en un régimen de este tipo se rige por una combinación de efectos marginales y de película fluida. La interacción parcial ocurre entre una o más capas moleculares de películas de lubricación marginal. La acción parcial de la lubricación de película fluida se desarrolla en el volumen del espacio entre los sólidos. El espesor promedio de la película en una conjunción de este tipo es menor a una micra pero mayor a 0.01 micras.

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.

Esta es una primera parte de una serie de tres, que rescatan en forma muy resumida esta insondable ciencia, comprenderá el lector que es imposible abarcar todos los términos y definiciones que encierra la Tribología, esperamos que cualquier duda o requerimiento de mayor información la hagan llegar por este mismo medio para que estas sean aclaradas, los esperamos para el próximo boletín, atte.

Widman International SRL contribuye a la capacitación de los ingenieros y usuarios en Bolivia para mejorar su competitividad. Para mayores informaciones prácticas, viste nuestra página Web: www.widman.biz

Si usted conoce a otra persona que estará interesada en recibir estos boletines, favor responder al scz@widman.biz recibir estos boletines mensualmente, favor responder al scz@widman.biz con "remove" en el asunto.

La información de este boletín técnico, es de única y completa propiedad de Widman International S.R.L. Su reproducción solo será permitida a través de una solicitud a scz@widman.biz no permitiendo que esta altere sus características ni su totalidad.