

El concepto de Tribodiseño. Su aplicación The Concept of Tribodesign. Its Application



✉ Francisco Martínez-Pérez *

CU-ID: 2177/v31n2e09

Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE), Centro de Estudios de Ingeniería de Mantenimiento, Marianao, La Habana, Cuba.

RESUMEN: El comportamiento de la influencia de las fuerzas en los materiales es un reconocido estudio básico en la ingeniería de diseño. La interacción de las superficies en contacto en movimiento relativo no debe ser obviada como un estudio especial, ya que, al igual que la resistencia de materiales, esto es un elemento básico en cualquier ingeniería de diseño. La Tribología, nombre con que se ha designado a la ciencia y tecnología de las superficies interactuantes en movimiento, es uno de los más importantes y básicos conceptos en ingeniería y especialmente en la ingeniería del diseño. Este debe, sin dudas, ser empleado en la designación de un nuevo término "Tribodiseño". Así el Tribodiseño concierne a todos los elementos de máquina que se diseñen donde la fricción, la lubricación y el desgaste juegan un papel fundamental. Es un hecho obvio, pero fundamental, que hoy en día, la asistencia o ayuda práctica de la Tribología se basa no solo en el mantenimiento, sino también en su aplicación en el diseño de los elementos de máquina y la maquinaria.

Palabras clave: diseño, tribología, ingeniería, ciencia, tecnología.

ABSTRACT: The behavior of the influence of forces on materials is a recognized basic study in design engineering. The interaction of surfaces in contact in relative motion should not be ignored as a special study, since, like the resistance of materials, this is a basic element in any engineering design. Tribology, the name given to the science and technology of interacting surfaces in motion, is one of the most important and basic concepts in engineering and especially in design engineering. This should, without doubt, be used in the designation of a new term "Tribodesign". Thus, the Tribodesign concerns all the machine elements that are designed where friction, lubrication and wear play a fundamental role. It is an obvious, but fundamental fact that today, the assistance or practical help of Tribology is based not only on maintenance, but also on its application in the design of machine elements and machinery.

Keywords: Design, Tribology, Engineering, Science, Technology.

INTRODUCCIÓN

El comportamiento de la influencia de las fuerzas en los materiales es un reconocido estudio básico en la ingeniería de diseño. La interacción de las superficies en contacto en movimiento relativo no debe ser obviada como un estudio especial, ya que, al igual que la resistencia de materiales, esto es un elemento básico en cualquier ingeniería de diseño.

La Tribología, nombre con que se ha designado a la ciencia y tecnología de las superficies interactuantes en movimiento, es uno de los más importantes y

básicos conceptos en ingeniería y especialmente en la ingeniería del diseño. Este debe, sin dudas, ser empleado en la designación de un nuevo término "Tribodiseño" (Martínez, 2010). Esto no incluye varios tipos de desgaste mecánico, tales como: la erosión y, la cavitación. Así el Tribodiseño concierne a todos los elementos de máquina donde la fricción, la lubricación y el desgaste juegan un papel fundamental. Es un hecho obvio, pero fundamental, que la asistencia o ayuda práctica de la Tribología se basa en su aplicación en el diseño de los elementos de máquina y la maquinaria.

* Author for correspondence: Francisco Martínez-Pérez, e-mail: fmartinez@ceim.cujae.edu.cu, fmartinezperez2013@gmail.com

Recibido: 12/08/2021

Aceptado: 14/03/2022

Para lograr la integración de la Tribología y el Tribodiseño en la ingeniería mecánica y en el diseño mecánico, es ventajoso visualizar la tarea de controlar, en forma adecuada, el flujo de fuerzas, energía y de materia, incluyendo la interacción de estas diferentes formas de flujo. El movimiento es también esencial cuando se considera la energía cinética como una variación de tiempo controlada en la posición de algunos elementos.

En general, la transmisión de carga está asociada a la concentración de la presión de contacto, independientemente de dónde está concentrada, si en una superficie conformada, como es el caso del soporte de un torno o en el caso cojinete de un manguito; o donde la superficie no es conformada, como es el caso del contacto entre dos dientes de engranajes convexos o levas. En el primer caso, el contacto, debido a la calidad de las superficies, se confinará primeramente en las asperezas de mayor altura y posteriormente se irá dispersando en el proceso de desgaste. En las superficies no conformadas, aun cuando ambas sean perfectamente lisas, el contacto tenderá a concentrarse por sí mismo. Esta área de contacto es denominada hertziana, debido a que, es un régimen elástico.

Es claro poder establecer que las áreas conformadas o no conformadas de las superficies en contacto, donde se establece el flujo de las fuerzas para transmitir el movimiento serán mucho menores que el área aparente en que se genera la deformación de los cuerpos en contacto. Esto es similar a decir que se determina una concentración de esfuerzos. Así, aunque la carga a transmitir sea pequeña la concentración de esfuerzos será grande en condiciones de trabajo en seco. Esta concentración de esfuerzos puede ser atenuada, o inclusive evitada en forma efectiva, mediante el flujo de una capa total de lubricante (Stolarski, 1990; Bayer, 2008; Martínez, 2010).

El objetivo del trabajo es brindar los elementos necesarios para adquirir los principales conocimientos concernientes al Tribodiseño y analizar su aplicación a varios de los más importantes elementos de máquina.

DESARROLLO DEL TEMA

Principios específicos del Tribodiseño

Dos principios, específicos del Tribodiseño son, el de prevenir el contacto entre las superficies en movimiento y el de considerar la película lubricante como un elemento más de máquina y de acuerdo con esto, considerar que los lubricantes son materiales de ingeniería.

En su forma más general el principio de prevenir el contacto entre las superficies en movimiento no es el hecho de evitar el contacto, sino el de tener en cuenta las consecuencias del mismo; tales como riesgo de

sobreesfuerzos de la superficie del material del cuerpo en movimiento, o sea el desgaste mecánico. Este principio, muy importante en el Tribodiseño, puede ser ejecutado de formas diferentes. Cuando éste se combina con otros principios, como el de agrupar de forma óptima las funciones, lleva a la conclusión de la necesidad de una capa protectora. Tal capa, que cubre la superficie de deslizamiento, es empleada frecuentemente como sustrato del desgaste. La acción protectora puede ser, por ejemplo, el disminuir la presión de contacto mediante el empleo de una capa relativamente baja y de bajo coeficiente de fricción, de sólido suave, reduciendo así, el riesgo de sobre concentración de esfuerzos en la capa de la superficie de deslizamiento. Este es un principio relacionado con la novedosa ciencia de la Ingeniería de Superficies (Martínez, 2012).

La capa protectora tiene diversas formas y es uno de los aspectos más importantes en cuanto a la al principio de atenuar el contacto entre las superficies de deslizamiento. Al mismo tiempo, el principio de agrupación de las funciones debe ser empleado, ya que el sustrato de la superficie de deslizamiento tiene sus funciones propias. La protección es asignada a la capa y la resistencia estructural depende del material del sustrato. De hecho, el sustrato sirve en la mayoría de los casos como del material más blando de la capa, permitiendo así la transmisión de la carga externa. Como la capa protectora es un elemento interpuesto al flujo de fuerzas, debe ser diseñado para no fallar en cuanto a la transmisión de la carga al sustrato (Martínez, 2016). Desde este punto de vista, debe hacerse una distinción entre capas protectoras hechas de un material sólido (mediante tratamientos térmicos, termoquímicos, de deposición) y aquellos consistentes de fluidos, que bien puede ser un líquido o un lubricante gaseoso.

Las capas protectoras sólidas deben ser concebidas en primer lugar. En superficies sólidas conformadas particularmente, es frecuentemente preferir el empleo de capas protectoras más débiles que el material del sustrato y la otra superficie del par. Tal capa protectora puede ser utilizada sin grandes riesgos de fallo estructural del material relativamente más blando. En caso de superficies conformadas, este puede ser explicado mediante una ligera penetración de las asperezas del material más duro del par en la capa protectora. De hecho, la profundidad de la penetración es comparable al tamaño de micro contactos formados por las asperezas superficiales. Esto es característico en superficies de contacto de superficies conformadas. A menos que la capa protectora sea extremadamente blanda y gruesa, las áreas de contacto, y la profundidad de la penetración, nunca serán mayores que las de las dos superficies del par de contacto en movimiento.

Otros factores a considerar son, el efecto de fortalecimiento y rigidez que ejercen en la capa

protectora el material del sustrato. En una capa protectora de poco espesor, el soporte que ejerce el resistente sustrato, en particular cuando el enlace entre capa y sustrato es fuerte, brindará a la capa gran resistencia. Mientras la capa sea más delgada, mayor será el efecto de rigidez que ejerce el sustrato. Sin embargo, esta rigidez generará una disminución del enlace entre capa protectora y sustrato. Para que el efecto de fortalecimiento del sustrato a la capa protectora sea efectivo, su espesor no debe ser superior a la profundidad de penetración. Más aún, el espesor de la capa debe ser superior a la profundidad de penetración para soportar la desalineación o la deformación de al menos uno de los dos cuerpos en contacto, así como para asimilar los efectos de partículas duras que hayan sido atrapadas entre las dos superficies en contacto.

La situación de capas protectoras sólidas en capas no conformadas, como es el caso de los engranajes, es ligeramente diferente, ya que la profundidad de la penetración es mucho mayor, no evitándose el flujo de la penetración de las fuerzas. La razón de esto reside en el hecho de que el área de contacto hertziana es mucho mayor que las pequeñas áreas de contacto entre las asperezas de los dos cuerpos de superficies no conformadas. Por ello, la fortaleza volumétrica de la capa protectora deberá ser igual o mayor que la del sustrato. Estos dos efectos pueden lograrse cuando la capa protectora del engranaje se logra mediante tratamientos superficiales como la cementación. En ocasiones se piensa que capas blandas protectoras logradas en superficies no conformadas, como la deposición de cobre en engranajes, son efectivas; pero esto solo es así para el proceso de asentamiento y no para lograr durabilidad.

Los líquidos y gases forman capas protectoras que son sinónimo de capas fluidas totales. Desde el punto de vista del Tribodiseño y del diseño de elementos de máquina, estas capas muestran varios aspectos interesantes ya que constituyen la más completa realización de capas protectoras. En cualquier capa fluida total, las presiones deben ser formadas hidrodinámicamente, de forma tal que balanceen la carga transmitida a través de la película de fluido de la frontera de la superficie de un cuerpo al otro ([Jost, 1990](#)). Estas dos superficies deben ser mantenidas separadas e forma tal que el contacto entre los dos cuerpos se evite totalmente. Esto solo será posible lograrlo totalmente en superficies conformadas. Esto será siempre mejor logrado con capas fluidas completas que con cualquier otra capa sólida. Aún en superficies no conformadas donde la capa fluida extremadamente fina tiene un carácter elastohidrodinámico, el evitar las presiones de contacto debe ser evitado.

Problemas tribológicos en el diseño de los elementos de máquina

Veamos algunos de los problemas tribológicos que se encuentran en los elementos de máquina más comunes.

Cojinetes de deslizamiento

Cuando un cojinete de deslizamiento trabaja en condiciones de lubricación hidrodinámica, se desarrolla una capa de lubricante hidrodinámica. En estas condiciones las superficies conformadas son separadas completamente y un flujo copioso de lubricante prevé el sobrecalentamiento. Con estas condiciones, de total separación de las superficies, no ocurre desgaste mecánico. Sin embargo, esta situación ideal, no siempre se garantiza ([Kragelski, 1965](#)).

En ocasiones, bien por desalineamiento o por el mal montaje o por problemas de naturaleza transientes, tales como distorsión elástica o térmica, pueden ser causa de contacto metal-metal. El contacto puede surgir en el arranque (antes de que la capa de lubricante haya tenido la oportunidad de formarse totalmente), el cojinete puede sobrecargarse de tiempo en tiempo y tener lugar la penetración de partículas de desgaste, de otros lugares, arrastradas por el lubricante sin haber sido filtradas.

En casos particulares como es el de motores de combustión interna, puede ocurrir la formación de ácidos u otras sustancias corrosivas durante la combustión, más cuando ésta es incompleta, las cuales son transmitidas al lubricante, causando desgaste químico. Las variaciones de presiones hidrodinámicas en el árbol pueden provocar desprendimiento de partículas; lo que constituye la causa fundamental de aparición de partículas extrañas en el lubricante ([Bowden & Tabor, 1954](#)). Estas partículas pueden ser atrapadas entre el soporte del cojinete y este último o son embebidas en el material más blando, dando lugar a un proceso de desgaste abrasivo (ralladura) en el material duro del árbol. Procesos de cromado en cojinetes de cigüeñales resultan, a veces, satisfactorios para combatir el desgaste abrasivo o químico.

Rodamientos

Los rodamientos constituyen la clase más alta de elementos de máquina con características de contacto hertziano y las características de este tipo de interacción. Desde un punto de vista práctico, ellos pueden dividirse en dos clases; rodamientos de bolas y rodamientos de rodillos, aunque la naturaleza del contacto y las leyes que gobiernan la fricción y el desgaste es común para ambos casos.

Cualquier tipo de rodamiento es caracterizado por dos números, el rango de carga estática y la vida útil. La capacidad de carga estática es la carga que puede ser aplicada al cojinete, que o es estacionaria o sometida a un ligero movimiento de giro que no limita sus propiedades de rotación. En la práctica, se toma como carga máxima aquella para la cual, la deformación combinada de la bola o rodillo y la pista de rodaje en cualquier punto no exceda 0,001 del diámetro del elemento rodante. L_{10} es representa la capacidad de carga dinámica del rodamiento; que es la carga para la cual la vida útil del rodamiento es 10^6 revoluciones y la probabilidad de fallo es no mayor del 10%.

Como en la mayoría de la aplicación de la ingeniería, la lubricación de un rodamiento se toma en cuenta por dos razones; para controlar las fuerzas de fricción y para disminuir la probabilidad de fallo por contacto (pitting o fatiga). Es universalmente aceptado que la lubricación es capaz de propiciar la operación sin probabilidad de fallo por contacto en los rodamientos. El análisis y estudio de los métodos de fallos por contacto de los rodamientos permitirá a los ingenieros introducir modificaciones de diseño en las máquinas y en particular en mejorar la lubricación para evitar el fallo por contacto de los rodamientos (Ashby, 2011). Es por ello que el estudio combinado de los métodos de fallos y la lubricación de los rodamientos es un tema atractivo de investigación.

Pistones, aros de pistones y camisas de los cilindros.

Uno de los más comunes nudos tribológicos en la mecánica es el formado por el de un pistón dentro de un cilindro; pistón que a su vez contiene aros que forman los tres el conjunto tribológico. Este conjunto se encuentra en motores, compresores de gas y sistemas de vacío. La principal función de un pistón es el actuar como un sello y contra balancear la acción de las fuerzas de fluido que actúan en la cabeza del pistón. En la mayoría de los casos, son los aros los que ejercen la función de sellaje. Para lograr esto en máquinas hidráulicas, esto se compensa con un alto grado de precisión.

Aunque los pistones son normalmente lubricados, en la industria química emplean aros de pistón especiales que trabajan sin lubricación. Son hechos de materiales poliméricos que poseen propiedades auto lubricantes. Los fallos en el sistema, generalmente se debe a pérdidas de compresión. Los diseños de estos sistemas tienen que considerar un alto compromiso, ya que una lubricación muy efectiva que evite las pérdidas de compresión y la baja fricción puede conllevar a un elevado consumo de lubricante en los motores de combustión interna. Por otra parte, el desgaste fundamentalmente ocurre en la parte superior del pistón (aro de compresión) donde la combinación de la velocidad, la presión y la temperatura, conllevan

a la necesidad de una lubricación hidrodinámica (ASME, 1980). Las condiciones en los pistones donde alta corrosividad, debido a la presencia de sulfuro y otros elementos dañinos presentes en el combustible y en el aceite. Los aceites alcalinos son menos tendientes a la causa de desgaste abrasivo en los cilindros.

Levas y seguidores

Aunque la teoría elastohidrodinámica de la lubricación nos puede ayudar a comprender cómo tiene lugar el contacto en los seguidores, desde el punto de vista de su lubricación, aún no se puede ofrecer un claro concepto en su diseño.

Los sistemas de seguidores se emplean grandemente en la ingeniería. Los trenes de válvulas automotrices, es un sistema que incluye las complicaciones posibles en el contacto de seguidores. En el contacto de las levas automotrices, se presenta los máximos esfuerzos de Hertz (entre 650 y 1 300 MPa) y las máximas velocidades de deslizamiento, que pueden alcanzar 10 m/s. Los valores de película de lubricante esperados son comparables al mejor acabado superficial que puede ser obtenido mediante los normales procesos de maquinado en ingeniería. Y por supuesto el acabado superficial tiene un efecto decisivo en el comportamiento de este elemento; en el cual el contacto y su comportamiento tienen un marcado efecto en el calentamiento, por lo que se desea el menor valor posible de la fricción. Así, las exigencias del diseño de estos elementos son que las superficies de contacto y de la película de lubricante, soporten las cargas impuestas con el mínimo desgaste u otras formas de fallos superficiales (Sinatora & Mesa, 2003). Se puede concluir así que, en el Tribodiseño estos elementos es necesario evitar el fallo superficial.

Lo fundamental en el diseño de las levas y seguidores es el de asegurar una adecuada selección del lubricante y del espesor de capa. Se conoce que la disminución en el radio de la nariz del seguidor, incrementa los esfuerzos hertzianos, la velocidad relativa y también el espesor de la capa lubricante. Una leva o seguidor que presente en su funcionamiento el mayor espesor de capa, opera satisfactoriamente, mientras que espesores menores conllevan a un fallo prematuro. Las limitaciones en cuanto a la temperatura son importantes para evitar modos de fallos por limado superficial, en levas que operen en condiciones de presión y velocidad intensas. Las condiciones de trabajo en las levas y seguidores no son constantes y este aspecto es importante al diseñar estos elementos.

Transmisiones por fricción

Las transmisiones por fricción, cuyo empleo ha ido creciendo en diferentes variantes de transmisiones, son

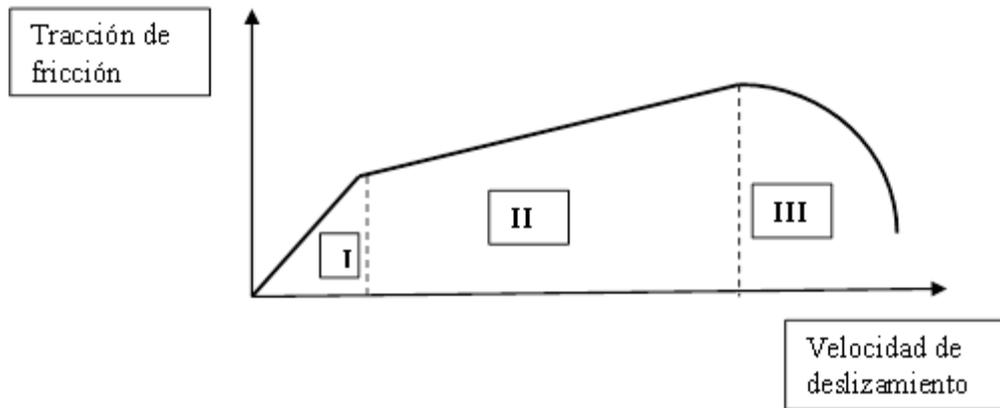


FIGURA 1. Formas de la dependencia de la tracción de fricción con la velocidad de deslizamiento.

el opuesto a las transmisiones hipoidales ya que aquellas parten del principio de que los elementos en fricción deben moverse sin deslizamiento y sean capaces de transmitir una fuerza periférica de uno a otro. Estas transmisiones normalmente trabajan en regímenes de lubricación elastohidrodinámica. Si la tracción de fricción se analiza en un gráfico en función de la velocidad de deslizamiento, se pueden identificar tres formas diferentes de dependencia (Figura 1).

En la primera etapa I, la dependencia es lineal en que la tracción de fricción es proporcional a la velocidad de deslizamiento. Después del cual se obtiene una segunda etapa II, de incremento de la tracción de fricción, hasta que se alcanza un máximo después del cual se presenta una tercera etapa III en que se observa una caída.

La etapa inicial I, se puede relacionar con las propiedades reológicas del aceite donde la viscosidad es parámetro predominante. No obstante, es algo sorprendente el máximo que se alcanza en la segunda etapa. Hoy se estima que bajo circunstancias apropiadas la capa de lubricante, bajo las altas presiones de contacto hertziano, se convierte en una especie de cristal sólido, que es común con otros sólidos que presentan un esfuerzo límite que se corresponde con el valor máximo alcanzado en esa etapa. Con respecto a la tercera etapa III, la caída en la tracción se atribuye fundamentalmente a la disminución de la viscosidad asociada con el incremento de la temperatura en el lubricante. Este tipo de transmisión no ha tenido la suficiente atención y los artículos publicados se relacionan principalmente con principios de operación y la cinemática del proceso (Bhushan & Gupta, 1991).

En transmisiones de fricción por rodadura, los valores máximos de esfuerzo de contacto hertziano pueden exceder 2 600 MPa. En condiciones normales de operación, la velocidad de deslizamiento es del orden de 1m/s lo cual es proporcionalmente un bajo valor de la velocidad de rodadura. Las transmisiones por fricción basan su efectividad en la fricción de tracción que se transmite a través del lubricante y por tanto se requiere del máximo coeficiente de fricción.

Como las velocidades de deslizamiento son relativamente pequeñas, es posible seleccionar materiales para las superficies de trabajo, resistentes al fallo por pitting y la optimización del comportamiento de la fricción se convierte en el parámetro de mayor importancia (Totten, 2018).

Engranajes de involuta

En el instante en que la línea de contacto cruza la tangente común a los diámetros primitivos, los dientes de los engranajes ruedan uno sobre los otros sin deslizamiento. Durante el periodo restante de contacto, donde la zona de contacto está en el adendum o el dedendum, tiene lugar un cierto deslizamiento relativo. De esta forma el tipo de fallo, llamado pitting, tiene lugar en este momento.

Existen evidencias de que, en engranajes con buena calidad de endurecimiento superficial, tiene lugar el arrastre de material en las zonas de desaceleración combinado con sobrecarga. No obstante, ante de alcanzar ese arrastre de material, tiene lugar otro tipo de daño en zonas localizadas en la vecindad de la zona de contacto de ambos engranajes (piñón y rueda dentada). El tipo de daño que ocurre es el de abrasión por partículas abrasivas desprendidas del borde del diente. Existen indicaciones de fatiga en la sub superficie debida a esfuerzos hertzianos. El crecimiento de las grietas de fatiga puede estar relacionado con lubricante atrapado en las grietas iniciales surgidas durante los sucesivos ciclos. Sin embargo, en procesos de transmisión donde existen presencia de altos esfuerzos, velocidades y altas temperaturas, el lubricante, verdaderamente es un material de ingeniería. Una serie de métodos han surgido para predecir la adecuada selección de lubricantes en los engranajes según Martínez (2010), que sirven como propósito de diseño, pero con limitaciones en cuanto a las dimensiones de los engranajes y de operación. La selección del lubricante debe tener en cuenta el criterio de temperatura crítica para determinar el espesor de la película de lubricante.

En engranajes de baja velocidad de operación que operan a esfuerzos por encima de los 2000 MPa con un espesor de capa de película de lubricante de algunos μm , no se han apreciado signos de desgaste después de miles de horas de operación. En engranajes de alta velocidad de operación trabajando con un espesor de capa de lubricante de 150 μm , frecuentemente fallan por ralladura en transmisiones de turbinas de gas.

Un segundo concepto, que gana aceptación, es el de que la ralladura ocurrirá cuando se alcance una temperatura crítica, lo cual es una combinación del lubricante inapropiado y de los materiales en las caras de los dientes.

Engranajes hipoidales

Los engranes hipoidales se emplean normalmente en la transmisión en ángulo recto, asociado a los ejes de los automóviles. La acción en los dientes, combina la de rodamiento, característica de los engranes cónicos de espiral con un cierto grado de deslizamiento, que hace a estos engranes críticos desde el punto de vista de la carga superficial.

La operación exitosa de estos engranes depende del empleo de los llamados aceites de extrema presión, típica en lubricantes con contenido de aditivos que forman una capa protectora a temperaturas elevadas. Hay varios aditivos que confieren estas propiedades. Aditivos llamados de jabón de plomo, con contenido de sulfuro, previene de la acción de ralladura en transmisiones que no han tenido aún asentamiento, particularmente en engranes que no han sido fosfatados. Ellos no son satisfactorios cuando haya gran torque, pero son efectivos a altas velocidades de transmisión. Los aditivos de cloruro de plomo y azufre son buenos en transmisiones de alto torque y bajas velocidades, no siendo así cuando las velocidades son elevadas. Las prevenciones de los modos de fallo son por pitting y rallado.

Tornillos sinfin

Estas transmisiones son algo especiales, debido a que el grado de conformidad es mayor que en cualquier otro tipo de transmisión. Pueden ser clasificadas como de un par de tornillos. Las transmisiones de este tipo presentan una situación totalmente crítica debido a su elevado grado de deslizamiento. Desde el punto de vista del desgaste, la combinación más aceptable es la combinación de materiales de bronce fosfórico con acero endurecido (Martínez, 2000). También resulta importante un buen grado de acabado superficial y el garantizar un montaje preciso y una posición rígida. Los lubricantes empleados para estas transmisiones generalmente con tiene aditivos activos superficialmente y el modo prevaleciente de lubricación es la mixta o límite. Por

tanto, el desgaste es medio y probablemente corrosivo debido a la acción de la lubricación límite.

La lubricación es un método poderoso para reducir la magnitud del desgaste en cojinetes y otros pares de fricción. Considerando K , una constante que representa un coeficiente de desgaste en el caso de deslizamiento lubricado, su valor puede resultar significativamente bajo si se consiguen condiciones hidrodinámicas de lubricación. Pero las condiciones hidrodinámicas no pueden mantenerse siempre, y cuando éstas pasan a lubricación límite, el valor de K puede alcanzar valores del orden de 10^{-6} , dependiendo de las propiedades del lubricante empleado. K es una constante, que en la ecuación de Archard, para desgaste deslizante, es:

$$K = QH/W \quad (1)$$

Siendo Q la magnitud de desgaste que depende del contacto entre todas las asperezas; P la presión de contacto que puede ser sustituida por la dureza del material que se desgasta y W la carga normal aplicada. Valores aceptables de K según manuales de ASME (1980), se brindan en la Tabla 1.

TABLA 1. Valores típicos del coeficiente K para desgaste lubricado por deslizamiento

Tipo de lubricación	K
Hidrodinámica	$< 10^{-13}$
Elastohidrodinámica	$10^{-13} - 10^{-9}$
Límite	$10^{-10} - 10^{-6}$
Lubricación sólida	$\approx 10^{-6}$
Sin lubricación (desgaste severo)	$10^{-4} - 10^{-2}$

Es evidente que el desgaste deslizante en condiciones de lubricación hidrodinámica, resulta el estado más deseable y en el diseño, se deben tomar todas las medidas para propiciarlo en las condiciones de operación. El factor más importante que determina el régimen de lubricación, es el espesor mínimo de capa lubricante comparado con las rugosidades superficiales, que puede ser calculado por nomogramas especializados, teniendo en cuenta otro factor λ , integrador de todos los parámetros influyentes (Stolarski, 1990).

Selección de materiales y de superficies en la ingeniería

La selección de materiales apropiados para la elaboración de componentes para pares de fricción, se circunscribe frecuentemente a factores que tienen poco que ver con la Tribología, como es el costo de los mismos, por ejemplo. El peso, es un factor que puede ser importante y también la resistencia a la corrosión. Las propiedades mecánicas, la rigidez y la tenacidad son de gran importancia, también, en las aplicaciones ingenieras. Aunque estos factores pueden limitar el diapazón de materiales a emplear, ellos

también sirven para establecer un espectro de soluciones factibles. Lo más conveniente siempre será la selección más integral, para lo que es conveniente el empleo de mapas de selección, como los de [Ashby \(2011\)](#).

Sin embargo, la mayoría de las propiedades enunciadas, excepto quizás la resistencia a la corrosión, son propiedades del volumen del material y esto brinda la posibilidad de concentrarse en variar las propiedades superficiales, de mayor importancia para la Tribología, mediante un espectro de diferentes métodos factibles a emplear. La modificación o recubrimiento de una superficie, con la finalidad de lograr combinaciones de propiedades en la superficie y en la subcapa, perteneciente al volumen del material, conduce a la llamada ingeniería de superficie. Los diversos procesos posibles de aplicar, deben ser considerados como parte esencial en el diseño de los sistemas tribológicos ([Martínez, 2009](#)). En la [Figura 2](#) se muestra un algoritmo que muestra la secuencia de pasos a seguir en el diseño de un sistema tribológico.

La selección de materiales y los métodos de obtención de las superficies ingenieras, para las aplicaciones tribológicas, depende en gran medida, del mecanismo y tipo particular de desgaste predominante.

En la [Figura 4](#) se muestra un esquema comparativo de valores típicos de coeficientes de desgaste K de diferentes materiales en condiciones de deslizamiento bajo diferentes formas de lubricación.

Los recubrimientos duros o las capas depositadas por difusión, que son también de una ductilidad muy limitada, presentan una buena resistencia a este tipo de proceso. Las superficies rugosas, preferiblemente las de estructuración aleatoria, (por ejemplo, las que se generan mediante (sand blasting), generalmente incrementan la resistencia al daño, probablemente debido a que el crecimiento de la unión es limitada. Por el contrario, superficies pulidas tienen una mayor probabilidad al daño.

La amplia diversidad de materiales superficiales ingenieros existentes, permiten al diseñador su selección, al menos con cierta amplitud, en vez de utilizar materiales volumétricamente iguales al de su superficie.

La [Figura 4](#) muestra el amplio rango de combinación de profundidad de capa y de dureza que puede obtenerse en las superficies por estos métodos.

De la [Figura 4](#) puede concluirse que diferentes métodos ofrecen diferentes posibilidades de combinación de profundidades y dureza de la capa superficial. Es de destacar que faltan algunos métodos como el níquel químico, el niquelado, el cromado el fosfatado y otros.

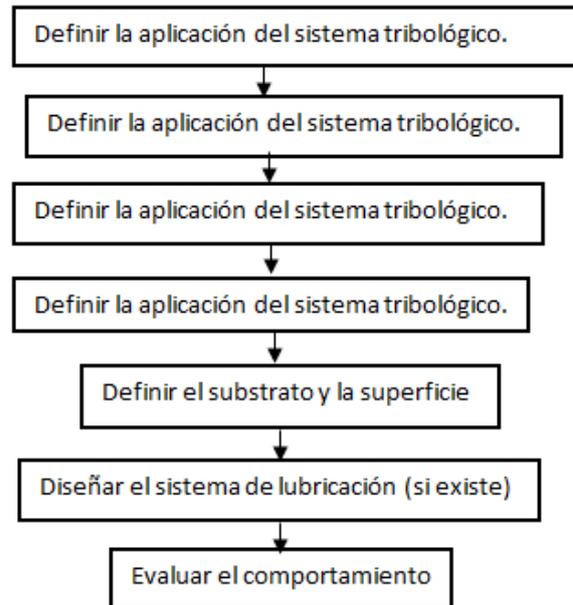


FIGURA 2. Algoritmo que ofrece el sistema de pasos a seguir en el diseño de un sistema tribológico.

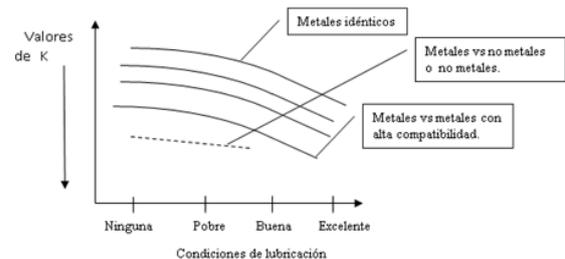


FIGURA 3. Valores comparativos de coeficientes de desgaste K de diferentes materiales en pares de deslizamiento bajo diferentes condiciones de lubricación.

CONCLUSIONES

Queda claro, de todo lo planteado que, el ingeniero responsable en el diseño, debe tener en cuenta los aspectos del Tribodiseño, ya sea aquel en cojinetes u otros sistemas de transmisión de movimiento y debe ser capaz de analizar la situación que confronte y tomar en consideración los aspectos importantes señalados, para su solución. Más aún, resulta obvio que una adecuada apreciación de la situación tribológica requiere un alto grado de sofisticación científica, teniendo, al mismo tiempo, los aspectos más modernos de la ingeniería y el conocimiento de los materiales a emplear. Hoy en día, dentro de los aspectos científicos, es necesario considerar aquellos relacionados con la Ingeniería de Superficies.

En el material se han brindado los elementos necesarios para adquirir los principales conocimientos concernientes al Tribodiseño, se ha analizado la aplicación del Tribodiseño a varios de los más importantes elementos de máquina. El concepto de capa protectora ha sido objeto de profundo análisis; diferenciando entre aquellos casos en que se desea concentrar los esfuerzos en la capa protectora, sin que éstos penetren en el material estructural del elemento, de aquellos en que se dividen los esfuerzos aplicados entre la capa protectora y la estructura del material base.

En ambos casos resulta de suma importancia combinar adecuadamente la resistencia de la capa protectora y su profundidad. Para ello se han analizado los posibles materiales a emplear para la formación de la capa y varios de las diferentes tecnologías que pueden ser aplicadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASHBY, M.F.: *Engineering Materials 2*, Ed. Cambridge University, Department of Engineering, England, 2011.
- ASME: *Wear Control Handbook*, vol. 1, USA, 413-476 p., 1980.
- BAYER, R.: *Mechanical wear, Fundamentals and Testing*, Ed. Decker Marcel Inc., New York, USA, 2008.
- BHUSHAN, B.; GUPTA, B.: *Handbook of Tribology*, Ed. McGraw-Hill, Chapter 4 ed., New York, USA, 1991.
- BOWDEN, F.P.; TABOR, D.: *The Friction and Lubrication of Solid*, Ed. Oxford Univ. Press, Oxford, England, 233-250 p., 1954.
- JOST, H.P.: *Tribology. Origin and Future*, Ed. Wear, vol. 136, vols. 1, Cambridge, United Kingdom, 1-17 p., 1990.
- KRAGELSKI, I.V.: *Friction and Wear*, Washington, D.C.; London: Butterworths, 1965.
- MARTÍNEZ, P.F.: *Tecnología de Tratamiento Térmico. Un enfoque sistémico*, Ed. Editorial Félix Varela, La Habana, Cuba, 2000, ISBN: 959-258-113-4.
- MARTÍNEZ, P.F.: *Tribodiseño*, Ed. Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE), La Habana, Cuba, Monografía, 2009, ISBN: 978-959-261-296-9.
- MARTÍNEZ, P.F.: *Tribología Integral*, Editorial Noriega, México, 2009. Dewey: 621.89, ISBN: 978-607-05-0271-2

Francisco Martínez-Pérez, Profesor Titular, Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE), Centro de Estudios de Ingeniería de Mantenimiento, Marianao, La Habana, Cuba, e-mail: fmartinez@ceim.cujae.edu.cu, fmartinezperez2013@gmail.com.

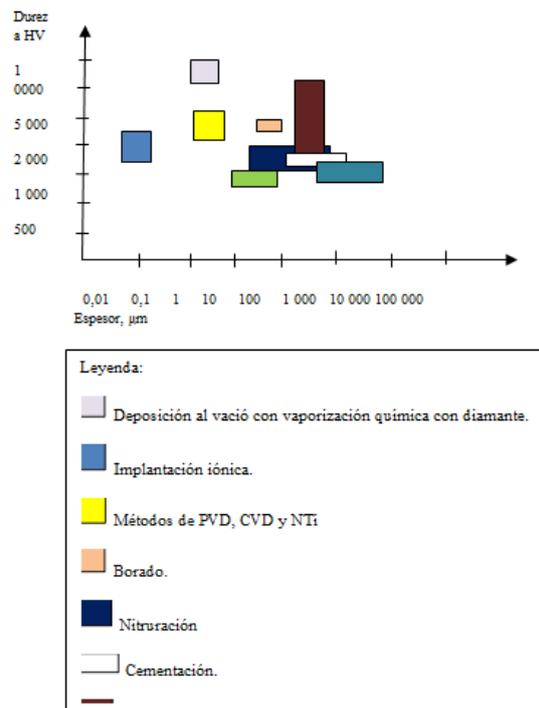


FIGURA 4. Profundidades y durezas típicas de diferentes formas de recubrimientos y endurecimientos superficiales.

- MARTÍNEZ, P.F.: “Análisis de la relación entre las propiedades de la superficie y el volumen del cuerpo desde la Ingeniería de Superficies”, *Revista Cubana de Ingeniería*, 3(2): 51-57, 2012, ISSN: 2223-1781.
- MARTÍNEZ, P.F.: “Procedimiento para la adecuada selección de aceros y de su tecnología de tratamiento térmico”, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 25(2): 58-64, 2016, ISSN: 1010-2760, e-ISSN: 2071-0054.
- SINATORA, A., MESA, D H.: “The Friction and Lubrication of Solid”, *Scientia e Technica*, 9(22), 2003, ISSN: 0122-1701.
- STOLARSKI, P.A.: *Tribology in Machine Design*, Ed. Industrial Press Inc, London, England, 1990.
- TOTTEN, G.: *Mechanical Tribology: Materials, Characterization, and Applications*, Ed. New York, S.A., New York, USA, George Totten, Ph.D., FASM Hong Liang, 2018, ISBN: FASM Hong Liang: 0-8247-4873-5, Cuba: ISBN: 978-959-261-593-9.

Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.