

Algunas recomendaciones en la enseñanza de la Tribología

Francisco Martínez Pérez

Correo electrónico:fmartinez@ceim.cujae.edu.cu

Alejandra García Toll

Correo electrónico:agarciat@ceim.cujae.edu.cu

Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

Resumen

La tribología es una ciencia que por su complejidad e interdisciplinariedad requiere, para su estudio, de la comprensión de una serie de aspectos imprescindibles. La experiencia profesional desarrollada en diferentes programas de enseñanza de posgrado, permite brindar recomendaciones referidas al tema. Por otra parte, la propia enseñanza de la tribología tiene aspectos esenciales que se hacen necesario comentar. En este artículo se brindan los elementos fundamentales para cumplimentar este objetivo.

Palabras clave: tribología, enseñanza, pedagogía

Recibido: 7 de febrero del 2011

Aprobado: 8 de abril del 2011

INTRODUCCIÓN

La experiencia adquirida en la impartición de cursos de Tribología en diferentes formas organizativas de posgrado asociados al mantenimiento o al diseño, indica que, aunque los estudiantes sean graduados de Ingeniería Mecánica, existen determinados temas deficitarios en su formación, y que por tanto, resulta imprescindible enfocarlos en el desarrollo del curso. Cuando los graduados son de otras carreras, en el caso del Mantenimiento (ingenieros civiles, industriales, químicos o eléctricos) el problema adquiere una mayor connotación.

Por otra parte, ya dentro de la propia enseñanza de la Tribología, algunos aspectos necesitan de un enfoque especial para su mejor comprensión. En el presente trabajo se hacen recomendaciones con el objetivo de solventar esta situación.

DESARROLLO

Para facilitar el objetivo de este trabajo, orientado a brindar recomendaciones que permitan ganar en calidad y profundidad en cursos de Tribología en la enseñanza posgraduada, se presentan aquellos conocimientos o enfoques que deben ser desarrollados al inicio del curso y otros a tratar durante la ejecución del mismo. Los primeros tienen como finalidad, cubrir zonas de insuficientes conocimientos en los graduados; en cuanto los segundos, pretenden orientar cómo desarrollar el curso en aquellos aspectos que no deben faltar o en la forma en que debe ser transmitido el conocimiento.

AL INICIO DEL CURSO

En todo curso el profesor debe tener suficiente información sobre los participantes en el mismo, y conocer su carrera de procedencia, sea esta la Ingeniería Mecánica o cualquiera

otra, incluso diferenciando bien aquellos que proceden de las carreras, en América Latina, con el nombre de Electromecánica, donde la adquisición de conocimientos en la esfera de la Ciencia de los Materiales es, por experiencia de los autores, insuficiente y en todo caso muy inferior a la de los graduados en Ingeniería Mecánica. En general, los aspectos a tratar tienen relación con esta ciencia y con la disciplina Metalurgia Mecánica. La experiencia de los autores demuestra que a los estudiantes, en su etapa de pregrado, aún a los de Ingeniería Mecánica, no se les brinda la información suficiente acerca de la interrelación de la Resistencia de los Materiales y el Diseño, con la Ciencia de los Materiales en aspectos muy necesarios y que serán analizados a continuación.

El primer aspecto a considerar debe estar orientado a que el estudiante conozca en detalle el proceso de deformación en los metales y su influencia en las propiedades de los materiales metálicos. El estudiante debe conocer y comprender que el movimiento de las dislocaciones es la forma preferencial de deformación en los materiales metálicos y por lo tanto el fortalecimiento del metal está asociado con la forma de frenar este movimiento.

Este frenado debe ser correlacionado con los factores que contribuyen a esto, como son: tamaño de grano, fronteras de interfaces (explicando aquí por ejemplo la diferencia en el espesor de las láminas de cementita en los aceros, la diferencia entre las láminas y los nódulos de grafito en los hierros fundidos y el efecto de la dimensión de las partículas de precipitado en las aleaciones no ferrosas). La explicación debe acompañarse con el análisis del criterio de que el fortalecimiento se logra debido al incremento de la densidad de las dislocaciones y debe relacionarse esto con el gráfico de resistencia contra densidad de dislocaciones (figura 1).

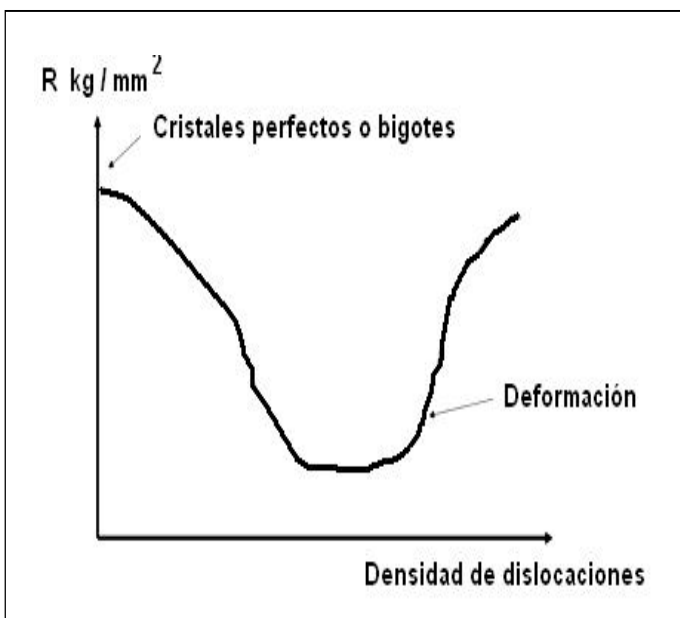


Fig. 1. Influencia de la densidad de dislocaciones en la resistencia de los materiales metálicos.

En función del auditorio, se hará necesario o no, el explicar o profundizar en temas que son propios de Ciencia de los Materiales. Los estudiantes deberán conocer acerca de otros materiales no metálicos como son los cerámicos, los polímeros y los de composición, comparando las propiedades de estos con la de los materiales metálicos.

Posteriormente se hace necesario valorar el efecto de la temperatura en las propiedades mecánicas, y explicar cómo este factor influye, según la ley de Fick, [1] en la movilidad de las dislocaciones y por tanto es un efecto contrario al fortalecimiento. Es importante que el estudiante comprenda cómo, en la detención o en la movilidad de las dislocaciones, reside el secreto de fortalecimiento de las aleaciones metálicas.

El efecto del fortalecimiento debe analizarse en el diagrama esfuerzo-deformación, explicando que, una vez sobrepasado el límite elástico de una material metálico, se entra en el campo de la deformación plástica y si en algún instante posterior se retira la carga actuante, el material regresa describiendo una línea paralela a la recta de esfuerzo-deformación original, pero permaneciendo ya una deformación que tiene como efecto, si el material es vuelto a cargar, un incremento en el límite elástico (figura 2).

Resulta interesante aquí preguntar a los estudiantes, qué ocurre en el gráfico a partir de que se sobrepasa el límite máximo de resistencia del material, ya que aparentemente, para seguir deformando, se requerirán menores esfuerzos, lo cual contradice lo antes explicado. Este análisis debe concluir después de explicar el efecto que la reducción del área de la probeta ensayada, tiene en la aparente disminución de los esfuerzos, al sobrepasar el valor de la resistencia máxima del material, con la explicación, poco conocida por los alumnos, de existencia de dos gráficos esfuerzo-deformación, uno aparente y otro real, donde esta contradicción no existe (figura 3).

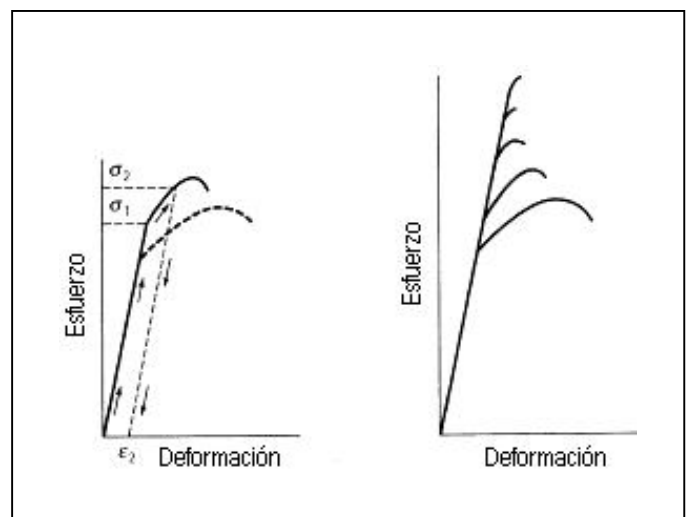


Fig. 2. Efecto de la velocidad de deformación y la magnitud de esta en la resistencia del material.

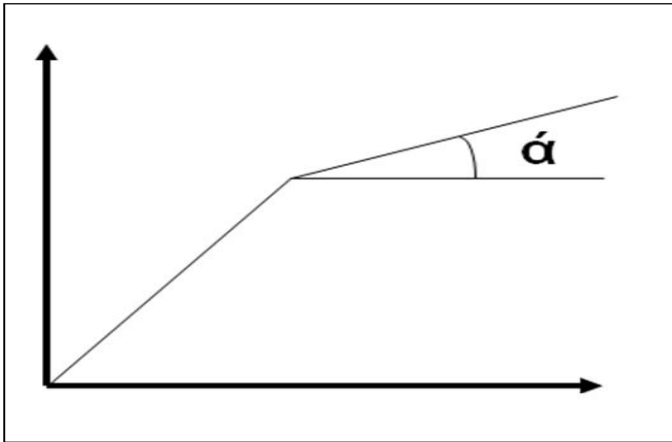


Fig. 3. Gráfico real esfuerzo-deformación.

Al gráfico real esfuerzo-deformación de la figura 3, se le debe extraer toda una serie de información muy importante para la Tribología, como es la del conocimiento del módulo $m = \text{tg } \alpha$, de fortalecimiento del material, explicando cómo al ser mayor la pendiente de la recta que se forma a partir del límite elástico, se incrementa la tg de α , ya en la zona de deformaciones plásticas, y cómo al incrementarse la tangente con el aumento del ángulo, los materiales con estas características, se fortalecen más para una misma deformación. Apoyándose en el gráfico es conveniente analizar el efecto que la velocidad de deformación tiene en el fortalecimiento del material, explicando así, cómo velocidad de deformación y temperatura tienen efectos yuxtapuestos. Para cada caso, la resultante dependerá de aquel factor con un mayor efecto. Esto puede ser ejemplificado mediante los procesos de embutición profunda, donde para evitar agrietamiento en los materiales es necesario acudir a procesos de tratamiento térmico de recristalización.

Utilizando el gráfico de la figura 2, es posible proceder a explicar cómo un material dúctil puede convertirse en frágil si la deformación se lleva a cabo mediante altas velocidades de deformación o si tienen lugar procesos continuos de deformación, cada vez más cercanos al del límite elástico.

Aprovechando el efecto que la temperatura produce en los materiales metálicos, es importante analizar el gráfico de tenacidad de impacto vs temperatura (figura 4), destacando la temperatura a que tiene lugar la transición dúctil frágil y cómo este aspecto es importante, tenerlo en cuenta en determinados elementos de máquina que trabajen en condiciones de temperaturas bajas, como por ejemplo, los esquineros de contenedores en países nórdicos o el de elementos que trabajan en condiciones criogénicas.

Con todos estos conocimientos impartidos y estudiados, es importante distinguir las diferencias entre tenacidad de impacto y tenacidad de fractura a partir no solo de los conceptos diferenciados de las propiedades, sino también en las características de sus ensayos. Aquí es imprescindible que el estudiante comprenda que hoy el concepto de material frágil o dúctil, debe ser entendido como el de aquel material que presenta regiones de elevadas concentraciones de

esfuerzos y conduzcan a la fractura del material. Esto será de gran importancia para el conocimiento del desprendimiento de partículas de material en el proceso de desgaste. De igual forma, el estudiante deberá conocer que la fractura de partículas de desgaste obedece a las mismas etapas de fractura de cualquier forma de carga actuante, explicando a su vez qué zonas pueden presentar en una superficie, condiciones para procesos de fractura en el desgaste.

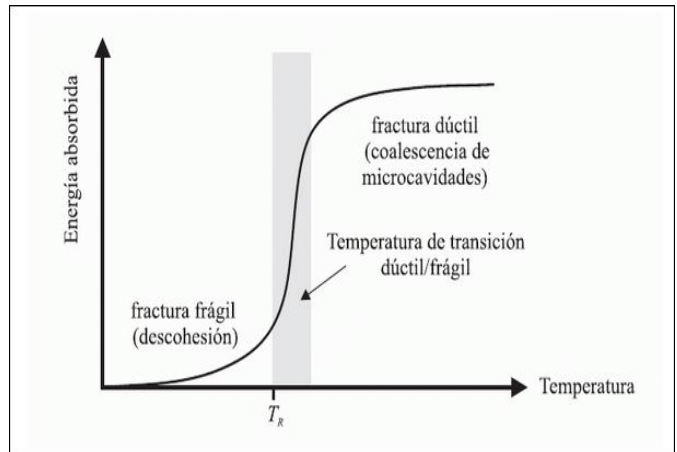


Fig. 4. Gráfico de variación de la energía absorbida en el impacto contra temperatura.

DURANTE EL DESARROLLO DEL CURSO

Con el objetivo de establecer con claridad, algunos de los principales aspectos que no deben faltar en un curso de Tribología [2] y brindar detalles sobre procedimientos a seguir en el proceso de enseñanza y transmisión del conocimiento, serán presentadas a continuación siete recomendaciones a considerar durante el desarrollo del curso.

1. Uno de los primeros aspectos a comunicar en un curso de Tribología, cuando se hable de su importancia y características es el explicar cómo la tribología es aplicable no solo en el mantenimiento, como ha sido tradicional, sino también en el diseño, donde su aplicación tribológica, tiene una importancia decisiva.

2. El estudiante debe entender que la tribología como ciencia aplicada influye significativamente en el ahorro energético, [1] en la eficiencia y vida útil de las máquinas; en los costos de mantenimiento y en la preservación del medio ambiente.

En este sentido es sumamente importante que el análisis de cualquier par de fricción, sea considerado un proceso energético: Con energía que entra al sistema en forma de trabajo, energía que sale (menor que la que entró) y otra disipada internamente en el sistema (figura 5).

El estudiante debe conocer que mientras mayores sean las pérdidas, menor será la eficiencia del par de fricción. Todo esto tendrá una influencia decisiva en la economía del proceso, que tiene varios componentes.

Para ejemplificar lo anterior, pueden emplearse gráficos como el mostrado en la figura 6. [1,4]

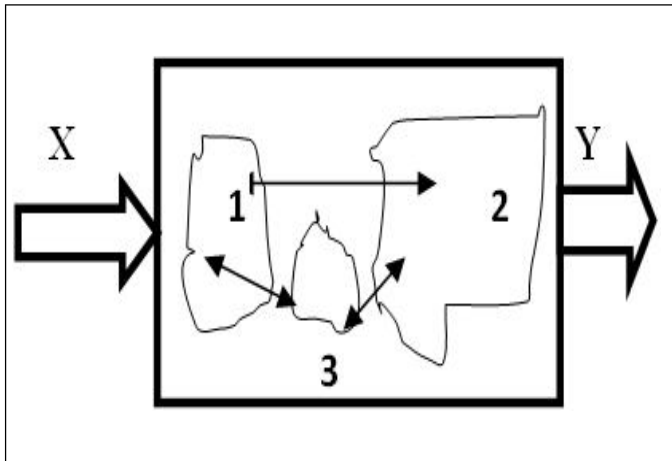


Fig. 5. Esquema del análisis del proceso energético en un par de fricción (X es la energía que entra al sistema; Y la energía que sale; 1, 2 y 3 son pérdidas energéticas internas).

Es importante destacar que cerca del 30 % de la energía que se pierde en la industria mundial, ocurre por la fricción. Países como Inglaterra, Japón y Alemania pierden anualmente más de dos mil millones de dólares como resultado del desgaste. [4]

3. El estudiante debe tener claro además, que las pérdidas tienen medios de detección y que forman parte de las técnicas de diagnóstico, tal es el caso de las vibraciones, la temperatura, el análisis de las diferentes propiedades del lubricante y de las partículas contenidas en el mismo, así como el ensayo no destructivo, entre otros.

4. Cuando se estudian las formas de disminuir la fricción, por lo general se analiza el efecto del lubricante. Efectivamente, el lubricante desempeña un papel esencial en la disminución de la fricción, pero no el único.

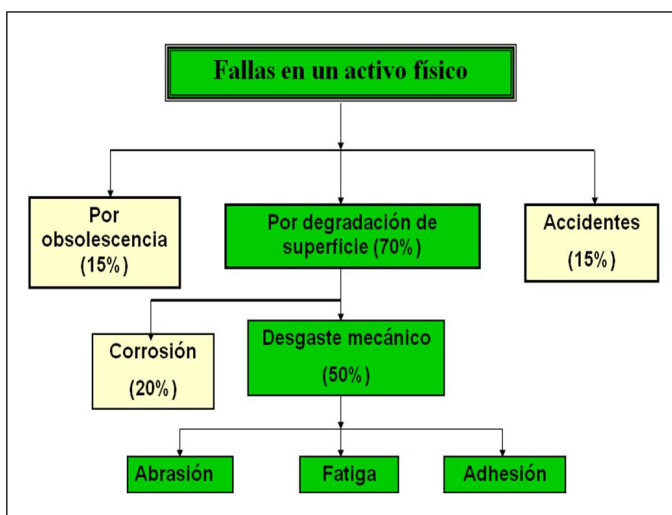


Fig. 6. Resultados de un estudio del profesor Rabinowicz del MIT que permite establecer que entre el 6 y el 7 % del PIB son requeridos solo para reparar los daños causados por el desgaste mecánico. En los EE.UU. esta cifra representó un promedio de 795 000 millones de USD.

Esto se debe, en primer lugar, a que hay procesos de fricción no lubricados y en segundo lugar, a que en la disminución de la fricción de pares lubricados, el lubricante solo es un factor más, aunque muy importante, pero puede estar perfectamente seleccionado y los problemas son debidos a otros factores como son: el sistema de lubricación que introduce defecto o exceso de lubricante en el sistema, la calidad superficial de los pares de fricción y las características físico-mecánicas de los materiales que conforman estos pares. Por otra parte y en tercer lugar, la disminución de la fricción puede lograrse a través del empleo de materiales superficiales, que presenten las características de muy baja resistencia a la fricción, como es el caso, por ejemplo, de la deposición por PVD al vacío de nitruro de titanio o de hafnio o de níquel químico, de sustancias con fósforo o mediante el empleo de materiales poliméricos o de composición.

5. Debe quedar bien definido y conceptualmente formar parte de la metodología en todo curso de Tribología, que el enfoque de esta, tanto en los servicios como en la industria, es indispensable realizarlo en forma de sistema (sistema tribológico), de ahí la necesidad de delimitar el sistema y caracterizar los tres grupos de factores (entrada, internos y salida). Los factores de salida tienen que tener la factibilidad de ser medidos, para que en cualquier análisis tribológico puedan ser correlacionados mediante modelación con los factores internos y externos del sistema (figura 7).

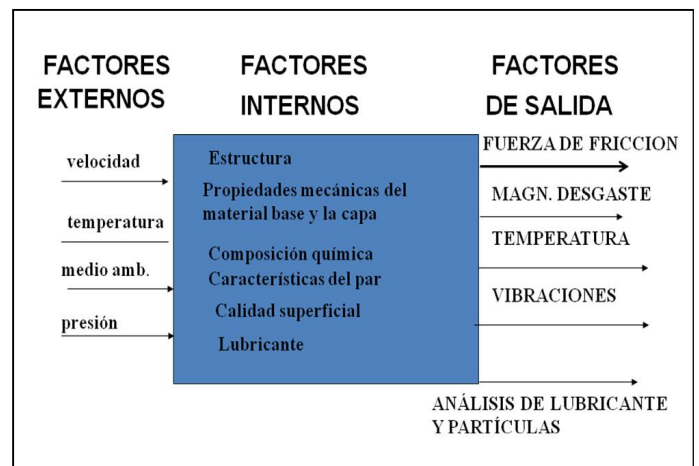


Fig. 7. Representación de un sistema tribológico.

6. Al analizar la interacción entre las superficies en contacto, resulta significativo realizar este análisis y a partir de enunciar que en esta interacción hay que tener en cuenta leyes esenciales y destacar que entre ellas están:

- El carácter tripartito del proceso, pues siempre al menos habrá tres cuerpos que intervienen en el contacto.
- El carácter puntual del contacto y como consecuencia, las elevadas presiones de contacto.
- Que en la interacción de los cuerpos rigen las mismas reglas de interacción de los sólidos, con la diferencia que

aquí el volumen de material es extremadamente pequeño y limitado a la capa más externa del material y cuando más a una zona por debajo de la misma, también muy pequeña.

- Que el proceso de fractura de partículas de desgaste, sigue las mismas leyes de los procesos de cualquier tipo de fractura (surgimiento de microgrietas, extensión y coalescencia de las microgrietas y fractura catastrófica).

- Que en cualquier cálculo de desgaste siempre habrá que considerar las características físico-mecánicas y geométricas de los dos elementos del par de fricción.

7. Por último, cuando se hable de los mecanismos de desgaste, generalmente se emplea la clasificación de Kragelski, como la más aceptada; ella enumera cinco mecanismos de desgaste, el microcorte, el de interacción elástica, el de interacción plástica, el adhesivo y el cohesivo. Sin embargo, todos pueden ser expresados en términos de ciclos de fatiga, así, el cohesivo y el de microcorte, en un ciclo de $n = 1$ (instantáneo), el plástico y el adhesivo tienen lugar en un número de ciclos entre 1 e ∞ , mientras que el elástico, tiende a un número de ciclos ∞ .

CONCLUSIONES

Las recomendaciones presentadas constituyen cuestiones de extrema importancia para la mejor comprensión de la Tribología, que constituye un aspecto tecnológico esencial tanto en el diseño como en el mantenimiento, en la actualidad; la experiencia de los autores, en diversas actividades de posgrado, tanto en Cuba como en países latinoamericanos, así lo demuestra.

REFERENCIAS

1. **MARTINEZ, F.** *Tecnología de tratamiento térmico*. Un enfoque sistémico. La Habana, Cuba: Editorial Félix Varela, 2000, ISBN 959-258-113-4.
2. **MARTINEZ, F.** *Tribología Integral*, México: Ed. Noriega, 2010.
3. **AMILTON SINATORA, Hernán and MESA Darío.** "Scientia e Technica", Oct. 2003, n°. 22, Año IX, ISSN 0122-1701.
4. **JOST, H. P.** "Tribology. Origin and Future", *Wear*, Cambridge, 1990, vol. 136, n°.1, pp. 1-17.

AUTORES

Francisco Martínez Pérez

Ingeniero Mecánico, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Centro de Estudio de Ingeniería de Mantenimiento (CEIM), Facultad de Ingeniería Mecánica, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

Alejandra Elena García Toll

Ingeniera Mecánica, Máster en Ciencias, Profesora Auxiliar, CEIM, Facultad de Ingeniería Mecánica, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba. Miembro del Comité de Normalización Cubano de Elementos de Máquinas.

Some Considerations in Tribology Teaching

Abstract

Tribology is defined as an interdisciplinary science and in order for one to understand fully its complexity it is important to first grasp the nature of its different aspects. Experience accumulated over the years in the different post graduate teaching field of this science permits the possibility to make comments on this topic. Moreover, the teaching of Tribology has some important aspects that need to be acknowledged and commented on. Thus, this article offers the supporting elements in fulfilling its objective.

Key words: tribology; teaching; pedagogy