


**ALGUNAS RECOMENDACIONES EN LA ENSEÑANZA DE LA
TRIBOLOGÍA EN LOS CENTROS UNIVERSITARIOS.**
SOME RECOMMENDATIONS FOR TEACHING TRIBOLOGY IN
UNIVERSITIES.

Francisco Martínez Pérez¹

 0000-0002-8947-7870

 fmartinezperez2013@gmail.com

Gasinski Lech²

 000-0001-9575-7767

¹Universidad Tecnológica de La Habana.

²Universidad Técnica de Poznan, Polonia

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 para su mejor comprensión. La experiencia profesional desarrollada en diferentes niveles de enseñanza ha permitido brindar recomendaciones en cuanto al tema. Por otra parte, la propia enseñanza de esta Ciencia tiene aspectos esenciales que se hace necesario comentar. En este artículo se brindan los elementos necesarios para cumplimentar estos fines.

Palabras claves: Tribología, Enseñanza

ABSTRACT

Tribology as a Science is very complex and interdisciplinary and requires for its study the comprehension of different aspects that are needed for its best understanding. Professional experience in the field of the teaching of this science at different levels gives the possibility for the recommendation of topics that had to be taken into account. In this article are giving the principal elements for this purpose.

Key words: Tribology, Teaching

Fecha de recibido 11/1/22

INTRODUCCIÓN.

La experiencia adquirida en la impartición de cursos de Tribología (Fricción, lubricación y desgaste) en diferentes formas de pregrado y posgrado asociados al Mantenimiento o al Diseño (Cursos de posgrado, Diplomados, Maestrías y Doctorados) indica que, aun cuando los estudiantes sean graduados de Ingeniería Mecánica, existen determinados temas que han estado ausentes en su formación y que por tanto, resulta imprescindible enfocarlos en el desarrollo del curso. Cuando los graduados son de otra carrera, en el caso del Mantenimiento (ingenieros civiles, industriales, electromecánicos, químicos o eléctricos) el problema adquiere una mayor connotación.

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

DESARROLLO.

Para facilitar el objetivo de este trabajo, de brindar recomendaciones que permitan ganar en calidad y profundidad en cursos de Tribología en la enseñanza universitaria, se dividirán las recomendaciones en aquellos conocimientos o enfoques que deben ser efectuados al inicio del curso y otros a abordar durante la ejecución del mismo. Los primeros tienen como finalidad, cubrir zonas de insuficiente conocimientos en los graduados; en cuanto los segundos, pretenden recomendar como desarrollar el curso en aquellos aspectos que no deben faltar o en la forma en que debe llevarse a cabo la transmisión del conocimiento.

AL INICIO DEL CURSO:

En todo curso el profesor debe tener suficiente información sobre los participantes en el mismo, referido a la carrera de la que son graduados, sea ésta la Ingeniería Mecánica o cualquier otra, inclusive diferenciando bien aquellos que proceden de las carreras, existentes en América Latina, con el nombre de Electromecánica, donde la adquisición de conocimientos en la esfera de la Ciencia de los Materiales es, por la experiencia del autor, insuficiente y en todo caso muy inferior a la de los graduados en Ingeniería Mecánica. Como se verá, los aspectos a tratar tienen relación con esta ciencia y con la disciplina de Metalurgia Mecánica. La experiencia del autor demuestra que a los estudiantes, en su etapa de pregrado, aún 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 [1-3] en aspectos muy necesarios y que serán analizados a continuación:

1. 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 comprender y entender 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 [5-6].

Este frenado debe ser correlacionado con los factores que contribuyen a esto como son: tamaño de grano, las 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**

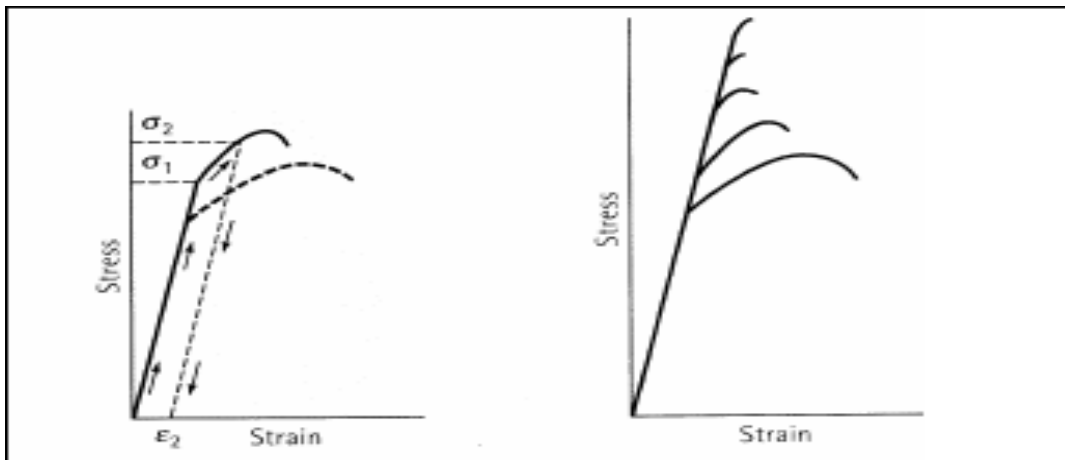
Figura. 1 Influencia de la densidad de dislocaciones en la resistencia de los materiales metálicos.



Por supuesto, en función del auditorio, se hará necesario o no, el explicar o profundizar en temas que son propios de Ciencia de los Materiales [6]. Los estudiantes deberán conocer acerca de otros materiales no metálicos como es el caso de los cerámicos, los polímeros y los de composición, comparando las propiedades de éstos con la de los materiales metálicos.

2. Inmediatamente de haber debatido a profundidad los anteriores conceptos, se hace necesario valorar el efecto de la temperatura en las propiedades mecánicas, explicando 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.
3. El efecto del fortalecimiento debe analizarse en el diagrama esfuerzo deformación, explicando cómo, una vez sobrepasado el límite elástico de una material metálico, se entra en el campo de la deformación plástica y cómo si en algún instante posterior, se retira la carga actuante, el material regresa por 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**

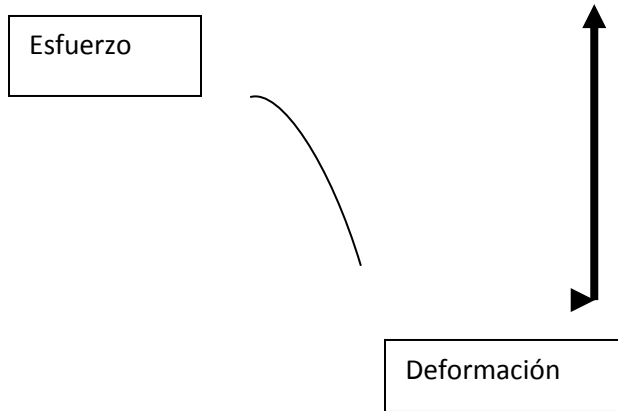
Figura. 2. Efecto de la velocidad de deformación y la magnitud de esta en la resistencia del material.



Resulta interesante aquí, el preguntar a los estudiantes, sobre este gráfico, qué ocurre, a partir de que se sobrepasa el límite máximo de resistencia del material; ya que aparentemente, para seguir deformando, se requerirían 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**

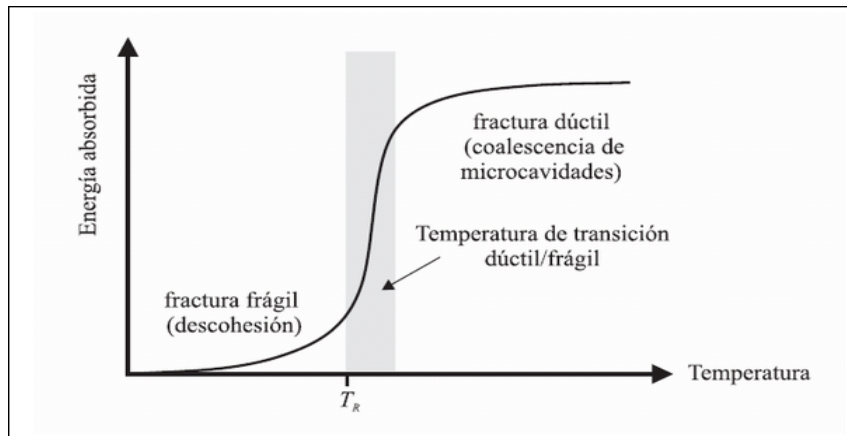
Figura. 3. Gráfico real esfuerzo-deformación.



4. Al gráfico real esfuerzo deformación de la figura 3, se le debe extraer toda una serie de información muy importante para la Tribología, cómo es la del conocimiento del módulo $m = \operatorname{tg} \alpha$, 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 incremento 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, como velocidad de deformación y la temperatura tienen efectos yuxtapuestos [2,7]. 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.
5. Utilizando el gráfico de la Fig. 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 se llevan a cabo procesos continuos de deformación, cada vez más cercanos al del límite elástico.
6. Aprovechando el efecto que la temperatura produce en los materiales metálicos, es importante analizar el gráfico de Tenacidad de impacto vs Temperatura (Fig.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 temperatura bajas, como por ejemplo los esquineros de contenedores en países nórdicos o el de elementos que trabajan en condiciones criogénicas.

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



7. 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 importante que el estudiante comprenda que hoy, el concepto de material frágil o dúctil, debe ser entendido como el de aquel material que presente regiones de elevadas concentraciones de esfuerzos y ellas 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 que zonas pueden presentar en una superficie condiciones para procesos de fractura en el desgaste.

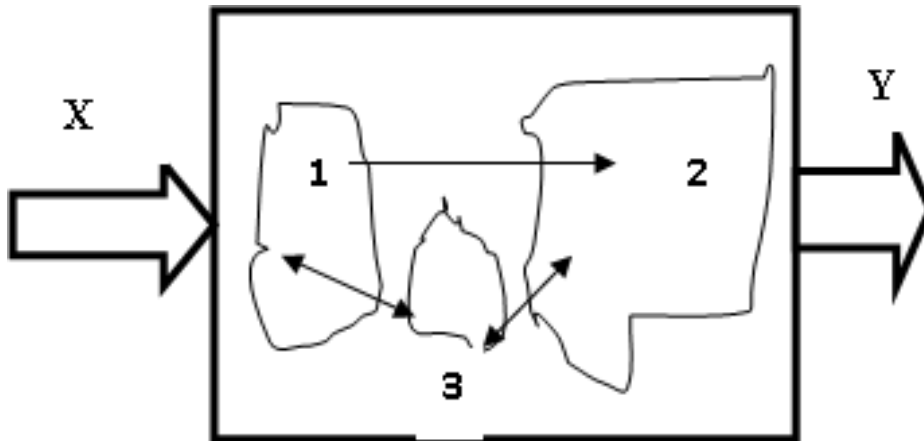
DURANTE EL DESARROLLO DEL CURSO.

1. Uno de los primeros aspectos a comunicar, en un curso de Tribología, cuando se hable de su importancia y características es el explicar como 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. En las características que le confieren importancia a la Tribología como Ciencia, debe estar claro para el estudiante que ésta, en su aplicación, influye significativamente en el ahorro energético [2,8], en el incremento en la eficiencia de los activos físicos y por consiguiente en el de su vida útil; en los costos del mantenimiento; en la preservación del medio ambiente y como conclusión, en la economía de la industria o los servicios, donde la Tribología sea aplicada.

Para entender esto, es sumamente importante que el análisis de cualquier par de fricción, parte del análisis de un proceso energético, donde hay energía que entra al sistema en forma de trabajo, energía que sale, menor que la que entró, por lo que parte de la cual se perdió internamente en el sistema **Figura. 5**

Figura 5. Análisis del proceso energético en un par de fricción (X energía que entra al sistema, Y energía que sale, 1,2 y 3 pérdidas energéticas internas).

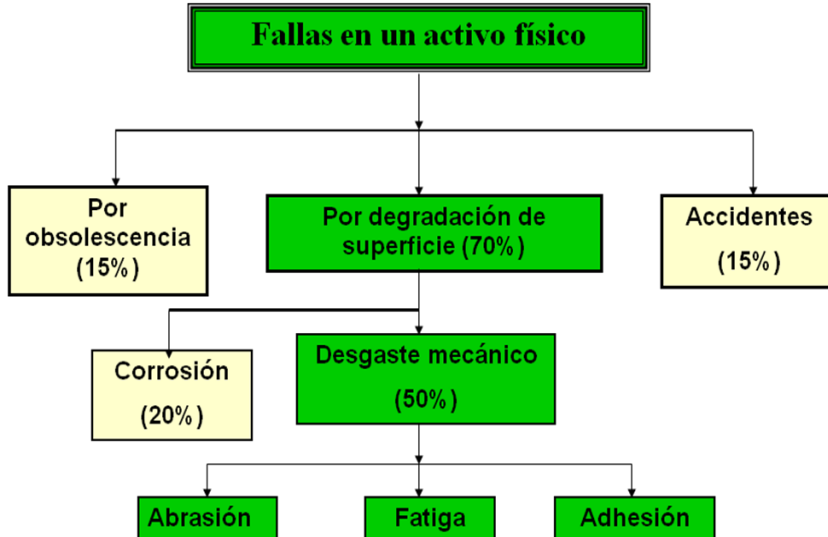


Para el estudiante tiene que estar claro que mientras mayores son las pérdidas, menor será la eficiencia del par de fricción. Todo esto tendrá una influencia decisiva en la economía del proceso, que tiene varios componentes.

Para ejemplificar esto. Pueden emplearse gráficos como el de la Fig. 6 [1,4].

Fig. 6 Estudio del Profesor Rabinowicz del MIT que plantea entre el 6 y el 7% del PIB se requieren solo para reparar los daños causados por el desgaste mecánico. En los EE.UU.

Esto fue de 795 000 millones de USD



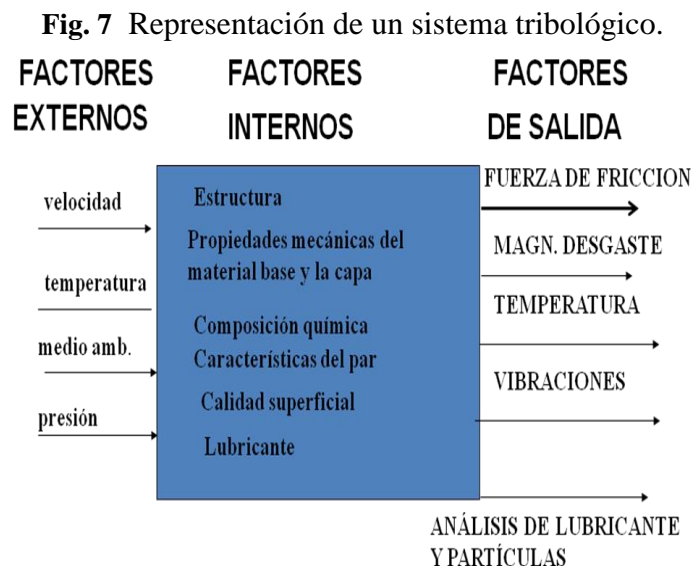
.Es importante destacar que cerca del 30% de la energía que se pierde en la industria mundial, se pierde en la fricción. Países como Inglaterra, Japón y Alemania pierden anualmente más de dos mil millones de dólares como resultado del desgaste [4].

3. Para el estudiante debe quedar claro que las pérdidas tienen medios de detección, 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 y finalmente el ensayo no destructivo.

4. Cuando se estudian las formas de disminuir la fricción, por lo general, se estudia el efecto del lubricante. Efectivamente el lubricante juega un papel esencial en la disminución de la fricción, pero no el único [2,9]. Esto se debe, en primer lugar, a que hay procesos de fricción no lubricados, en segundo lugar, en que en la disminución de la fricción de pares lubricados, el lubricante solo es un factor más, aunque cierto muy importante, pero el lubricante 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 poca 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 claro y conceptualmente debe formar parte de la metodología en todo curso de Tribología, que el enfoque de ésta, tanto en los servicios como la industria, es indispensable realizarlo en forma de sistema (el sistema tribológico) y de ahí la necesidad de delimitar el sistema y caracterizar los factores de entrada, internos y de salida del sistema. Los factores de salida tienen que tener la factibilidad de ser medidos, para poder que éstos, en cualquier análisis tribológico, puedan ser correlacionados, mediante modelación, con los factores internos y externos del sistema. (Fig. 7)



5. Al analizar la interacción entre las superficies en contacto, resulta significativo, el realizar este análisis a partir de enunciar que en esta interacción hay que tener en cuenta leyes esenciales, entre otras:

- El carácter tripartito del proceso, 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 micro grietas, extensión y coalescencia de las micro grietas 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.
6. 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 micro corte, 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 micro corte, tienen lugar 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 aquí presentadas han sido de extrema importancia en la mejor comprensión de la Tribología, que constituye un aspecto tecnológico esencial tanto en el diseño como en el mantenimiento. La experiencia que ha tenido el autor, en diversas actividades de pregrado y postgrado en diferentes Programas, tanto en Cuba como en países latinoamericanos, así lo demuestra.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Bowden, F.P.; Tabor, D. *The Friction and Lubrication of Solid* ; Oxford Univ. Press, 1954; 233–250 pp.
- [2] MARTINEZ Francisco, “*Tribología Integral*”, Editorial Noriega, ISBN: 9786070502712, Dewey: 621.89, México, 2009.
- [3] AMILTON Sinatora, HERNÁN MESA Darío, “*Scientia e Technica*”, Año IX, N22, Oct. 2003, ISSN 0122-1701.
- [4] JOST H. P. “Tribology. Origin and Future”, *Wear* V 136, N1, P 1-17, Cambridge 1990

- [5] B Bhushan, B Gupta. Handbook of Tribology. Chapter 4. New York: McGraw-Hill, 1991.
- [6] Martínez F. “Tecnología de Tratamiento Térmico. Un enfoque sistémico”, Editorial Félix Varela, La Habana, Cuba, 2000, ISBN 959-258-113-4.
- [7] Mechanical Tribology: Materials, Characterization, and Applications, George Totten, Ph.D, FASM Hong Liang, ISBN: 0-8247-4873-5, New York, .S.A.
- [8] FRICTION, WEAR, LUBRICATION, A TEXTBOOK IN TRIBOLOGY, K.C Ludema Professor of Mechanical Engineering, 2004, ISBN 0-8493-2685-0, The University of Michigan, USA.
- [9] LUBRICATION FUNDAMENTALS, D.M Pirro, A.A. Wessol, Marcell Decker, N.Y, USA, ISBN: 0-8247-0574-2

Conflicto de Interés

El autor no presenta conflicto de interés