

La Ciencia Tribológica: Su importancia en la industria, los servicios y en la educación tecnológica y universitaria

Tribological Science: Its importance in industry, services and technological and university education

Francisco Martínez Pérez^{1*} <https://orcid.org/0000-0002-8947-7870>

Alejandra García Toll¹ <https://0000-0002-9208-5413>

¹Centro de Estudios de Ingeniería de Mantenimiento, Universidad Tecnológica de La Habana.

alejandga@mecanica,cujae.edu.cu

Autor para la correspondencia. fmartinezperez2013@gmail.com

RESUMEN

Aunque sus principios físicos y matemáticos no eran conocidos, por la necesidad de su empleo la fricción y la lubricación fueron aplicadas desde épocas remotas de la humanidad y gradualmente, incorporado el desgaste, su conjunto fue siendo empleado en todo el decursar de la vida. Posteriormente, estos tres tan importantes, elementos, se unen para formar una de las ciencias de mayor desarrollo y necesaria aplicación, la Ciencia Tribológica. Hoy, su conocimiento forma parte obligada de todos los currículos de las carreras y maestrías de perfil mecánico e industrial. Su aplicación, inicialmente en el mantenimiento, es indispensable en el diseño y la producción de activos y maquinarias, constituyendo una nueva tecnología. En el presente artículo se describirán estos diferentes aspectos.

Palabras clave: tribología, diseño, mantenimiento, producción mecánica,

ABSTRACT

Nevertheless mathematical and physical principles not were known, by its used necessity, the employment of friction and lubrication were applied from the remotes eras and gradually, was include wear. These three aspects was later employed in all life development. Subsequently, these three important elements were joint to formed one of the most important, development and necessity science, Tribological Science. Today its knowledge is indispensable part of all mechanical and industrial curricula of courses and

master degrees. Its application, initially on maintenance, is obligatory on design and machinery production, being a new technology.

Key words: *tribology, design, maintenance, mechanical production.*

Recibido: 22/03/24

Aceptado: 17/09/24

INTRODUCCIÓN

En sí, la Tribología podría parecer algo nuevo, pero 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 ejemplos pueden situarse el empleo de la fricción para producir fuego y 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. Para realizar esta tarea utilizaban agua o grasa animal como lubricante. (Martínez, 1994); (Universidad de Navarra, 2013)

El artista-científico renacentista Leonardo Da Vinci fue el primero que postuló un acercamiento a la fricción. Da Vinci dedujo las leyes que gobiernan 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.

No se sabe si el descubrimiento de que, frotando dos pedazos de madera uno contra el otro, se producía fuego, era indicación de algún conocimiento elemental de la fricción.

Una pintura egipcia de los 1 880 antes de nuestra era muestra el traslado de una estatua de un peso de 60 toneladas, siendo llevadas por 172 hombres, empleando un lubricante, posiblemente aceite esparcido sobre pilotes de madera. Cálculos efectuados llegan a la conclusión que, con el peso de la estatua y la cantidad de pilotes, empleando aceite, puede haberse disminuido el coeficiente de fricción de la madera que es 0,45 a 0,15 con el empleo del aceite. De no haber usado el aceite, se hubieran necesitado para el traslado no menos de 700 hombres. La tecnología de la baja fricción en los elementos fue conocida por los griegos en los años 330 antes de nuestra era. Por otra parte, hay evidencias del empleo de cojinetes de madera en Italia alrededor del año 25 antes de nuestra era. (Martínez, 2010).

Los primeros síntomas de los conocimientos de la fricción como ciencia se atribuyen a Leonardo da Vinci en el siglo 10. Los años preliminares de formación de la teoría de la fricción coinciden con los de formación del pensamiento científico, es decir los que transcurren durante los siglos 18 y 19. Básicamente había dos escuelas de pensamiento: la escuela francesa que enfatizaba en la interacción mecánica (elástica) de las rugosidades de las superficies (irregularidades superficiales), y la escuela inglesa, que hacía énfasis en la cohesión o adhesión entre los materiales en contacto.

La contribución de la escuela francesa fue el de enfatizar que el contacto tiene lugar solo en puntos discretos. Su mayor error fue el considerar que la fricción tiene lugar solo por la geometría original de las asperezas de las superficies y el excluir la deformación plástica y la geometría de las irregularidades como parte de la causa.

La escuela inglesa fue comenzada por un francés Desaguliers, que introdujo la concepción de la existencia de fuerzas cohesivas (llamada hoy adhesión) entre los cuerpos. Desaguliers observó que, si dos bolas de plomo eran empujadas a permanecer juntas, imprimiéndole además un giro conjunto, permanecerían unidas y se necesitaría de la acción de una fuerza para separarlas. Consideró esta fuerza de cohesión como un fenómeno universal y sugirió que la fricción se debía a una cohesión que surgía entre las asperezas de los cuerpos en contacto.

El matemático suizo Euler, basado en la teoría de Amontons, sugirió que la fricción es causada por un efecto de cremallera y que el trabajo de fricción es el trabajo que se realiza para pasar un cuerpo por encima de las asperezas de otro. Las asperezas tendrían una pendiente igual, como mínimo, el ángulo de fricción. Este trabajo de Euler fue la primera

aproximación analítica de la fricción y la trató como parte de la mecánica de los cuerpos en movimiento. Fue además el primero de usar μ como el coeficiente de fricción y en trazar una clara distinción entre la fricción estática μ_e y la fricción cinemática μ_c .

El físico e ingeniero francés Coulomb confirmó las leyes de Amontons experimentalmente, casi 100 años después que fueron enunciadas. En 1781, sugirió que la fricción era causada por la trabazón experimentada entre las asperezas o irregularidades superficiales y que el tipo de material en las asperezas no tenía incidencia en la fricción. Muchos otros descubrimientos ocurrieron a lo largo de las historias referentes al tema, científicos como Charles Agustín de 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.

Las investigaciones de la fricción continuaron desarrollándose y a mediados del siglo 20 Bowden y Tabor, basaron sus teorías en las fuerzas de adhesión como la causa principal de la fricción, pero también mostraron que en el proceso de fricción se incluían deformaciones en la capa no solo externa, sino en el interior de ésta, lo cual hace que ambas acciones, la cohesión y la deformación, tuviesen una acción combinada decisiva en la disipación de energía por fricción. Ellos demostraron que las propiedades mecánicas de la superficie del material son muy importantes.

Finalmente, el científico ucraniano Kragelski introdujo, con pruebas experimentales, la teoría mecánico molecular de la fricción la que, por su concepción integral, es la que subsiste hasta el presente.

En el presente artículo se describe aspectos esenciales de esta ciencia, así como sus características y su aplicación en la vida científica, de la enseñanza y la actividad productiva.

DESARROLLO

El término Tribología se utilizó como tal por primera vez en un Congreso en Leeds, Inglaterra, en un informe presentado por el científico Jost en 1966. (Fig.1) La palabra

Tribología se deriva del término griego tribos, que significa fricción y logos, que significa estudio, así que la interpretación de la palabra puede ser, “el estudio o la ciencia del rozamiento”.

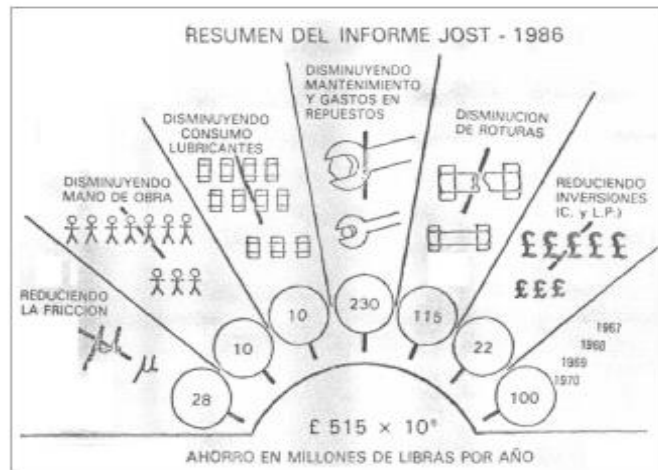


Fig. 1 Resumen del informe Jost.

En este informe Jost expuso el resultado de sus estudios y aplicaciones en procesos de mantenimiento, demostrando que su empleo permitía el ahorro de cientos de millones de libras de esterlinas en solo un año. Expuso como la tribología cumplía con las exigencias de las ciencias en todos los aspectos que de ellas se exigían: su multidisciplinariedad, es la única ciencia que garantiza un enfoque integral al analizar los nudos de fricción, es fuente para economizar recursos materiales y energéticos, está presente en toda industria y servicios, ha experimentado un rápido desarrollo, presenta una amplia publicación científica. Finalmente, en el Congreso, se aprobó la Tribología como Ciencia.

Para analizar la importancia de la Tribología, bastaría con hacer el análisis de tres aspectos:

a). Significado económico. 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. Pérdidas, solo por fricción en diferentes industrias y ramas económicas. En general las pérdidas son cuantiosas y no incluyen costos de mantenimiento. Analizando con más detalle algunas de las consecuencias de la fricción y el desgaste, se puede conocer que varias agencias dedicadas a la investigación sobre las consecuencias del desgaste refieren que los costos por desgaste significan, para cada ciudadano, un valor de entre 25 y 250 USD por día

(datos de 1996). El costo del desgaste en carreteras, en aviones y otros, no está agregado a este valor anterior. En cuanto a las pérdidas energéticas por desgaste, está referida solo al ahorro de combustible en vehículos automotores, en los que se pudiese reducir el desgaste de sus partes y la extensión de su vida útil.

Investigaciones recientes han sido realizadas por el eminente científico polaco Ernest Rabinowicz Fig.2, muestra el importante papel económico que la aplicación de la Tribología tiene tanto en el mantenimiento como en la eficiencia energética.



Fig. 2 Análisis de profesor Rabinowicz sobre el efecto económico que tiene la no aplicación de la Tribología.

b). Significado científico. Es conocido que todos los procesos macroscópicos en la naturaleza son irreversibles. La Tribología es una Ciencia necesaria para el estudio detallado de los procesos irreversibles que tienen lugar en la Mecánica en cuanto a la interacción de las superficies en rozamiento y que contribuye a explicar los fenómenos de la pérdida de energía y materiales en esa interacción. La publicación de literatura científica técnica en Tribología es considerable y ha experimentado, en los últimos años, un crecimiento significativo. A revistas como "Wear", "Journal of Tribology" y "Tribology International" se suman publicaciones periódicas de "Tribology Transactions of the Society of Tribologists and Lubrication Engineers" así como de la ASME y la ASTM. En

cuanto a libros, muchos han sido publicados, apareciendo cada año, al menos cinco nuevos en esta esfera, dirigidos a diferentes tópicos o disciplinas relacionadas. (Martínez, 1994; 2010); (Jost, 1991). Estados Unidos, Rusia y China son los principales productores de investigaciones y literatura científico técnica sobre la Tribología.

La Tribología ha propiciado el desarrollo de nuevos términos y aplicaciones (Bhushan y Gupta. (1991); (Martínez, 2017), Así para realizar las evaluaciones del consumo energético y las medidas para incrementar la eficiencia energética, surge el análisis tribo termodinámico (Fig. 3).

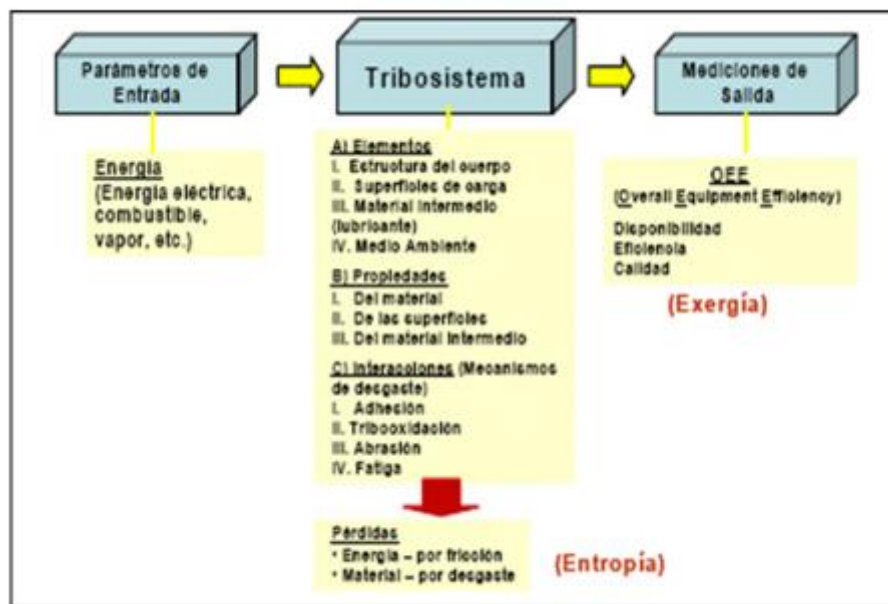


Fig. 3 Análisis tribo termodinámico en un activo industrial.

Conociendo y pudiendo medir los parámetros de entrada de cualquier activo industrial, así como pudiendo seleccionar factores medibles de salida, puede mediante correlaciones matriciales, conocer las pérdidas energéticas por fricción en el activo (entropía) y tomar medidas para incrementar la eficiencia del sistema (exergía).

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". 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.

Un componente de ingeniería generalmente falla cuando su superficie no es capaz de resistir, adecuadamente, las fuerzas externas del medio a la que es sometida. La selección de un material superficial con propiedades eléctricas, térmicas, magnéticas y ópticas y la suficiente resistencia al desgaste, la corrosión y degradación es fundamental para su funcionalidad.

La ingeniería de superficies, nuevo término, incluye la aplicación de tecnologías tradicionales e innovativas a los componentes y materiales de ingeniería para obtener materiales compuestos con propiedades que no son obtenibles por la superficie de materiales normales (Martínez,2022) Frecuentemente, las diferentes tecnologías de superficies son aplicadas en diseños de elementos de ingeniería, pero, idealmente, la superficie de ingeniería, no incluye ese diseño conociendo el tratamiento superficial a aplicar.

Esta innovativa y multidisciplinaria rama de la ingeniería, a través de un análisis tribológico del fenómeno del desgaste y de otros daños superficiales tales la corrosión y el empleo de la ciencia de materiales, permite optimizar las superficies expuestas en procesos externos tales como válvulas evaporadoras, intercambiadores de calor, bombas y compresores centrífugos, partes mecánicas y otros, para prolongar su vida útil.

c). Significado Interdisciplinario. Como la Tribología es una disciplina científico técnica, para su estudio es necesario la concurrencia de físicos, químicos, metalúrgicos, ingenieros mecánicos y especialistas de diferentes ramas del saber. Varios han sido los intentos de unificar el pensamiento en Tribología; sin embargo, subsisten divisiones filosóficas, las cuales son llevadas a los libros y diferentes publicaciones existentes en esta Ciencia. En los últimos tiempos estas divisiones pueden ser enumeradas como divisiones en instituciones académicas, cuyos cuatro desenvolvimientos fundamentales son:

- ✓ Mecánica de los sólidos. Esta se ocupa del análisis matemático de los esfuerzos de contacto y las variaciones de temperatura que experimentan las superficies rozantes.

- ✓ Mecánica de los Fluidos. Se ocupa del análisis matemático del comportamiento de los fluidos lubricantes en las diversas formas de las superficies deslizantes. Es la división más avanzada en lo concerniente a modelación.
- ✓ Ciencia de los Materiales. Se ocupa de los mecanismos a escala atómica y microescala de la degradación o alteración de las superficies durante el frotamiento.
- ✓ Química. Se ocupa de la reacción entre los lubricantes y las capas superficiales, así como entre superficies diferentes en contacto.
- ✓ En cada una de estas divisiones se ha llevado a cabo una serie de trabajos muy detallados y profundos, por lo que cada una requiere años de estudio y de preparación académica. Es por ello que lo mejor es la formación de equipos multidisciplinarios para la investigación y el desarrollo de cada problema práctico.

Aplicaciones de la Tribología

La Tribología está presente en prácticamente todos los aspectos de la maquinaria, motores y componentes de la industria en general. Los componentes tribológicos más comunes son:

- Rodamientos
- Frenos y embragues
- Sellos
- Anillos de pistones
- Engranajes y levas

Las aplicaciones más comunes de los conocimientos tribológicos, aunque en la práctica no se nombren como tales, son:

- Motores eléctricos y de combustión (componentes y funcionamiento)
- Turbinas
- Extrusión
- Rolado
- Fundición
- Forja
- Procesos de corte (herramientas y fluidos)
- Prótesis articulares (cuerpo humano)

La aplicación de los conocimientos de la Tribología en estas prácticas deriva en:

- Ahorro de materias primas

- Aumento en la vida útil de las herramientas y la maquinaria
- Ahorro de recursos naturales
- Ahorro de energía
- Protección al medio ambiente
- Ahorro económico.

Significado de la tribología en la industria.

La tribología es crucial para la maquinaria moderna que utiliza superficies rodantes y/o deslizantes.

De acuerdo a algunos estimados, las pérdidas resultantes de la no adecuada aplicación de la tribología en los Estados Unidos representan aproximadamente el 6% del total del producto bruto (\$200 billones de dólares por año en 1966, muy superior en la actualidad), y aproximadamente un tercio de los recursos energéticos existentes se pierden en forma de fricción. Por esto, la importancia de la reducción de la fricción y el desgaste para un ahorro de dinero y una confiabilidad a largo plazo de la maquinaria. Según Jost (1966,1976), el Reino Unido podría ahorrar aproximadamente 500 millones de libras al año, y los Estados Unidos llegarían a ahorrar hasta 16 billones de dólares al año utilizando mejores prácticas tribológicas. Este ahorro es significativo y puede obtenerse sin hacer una gran inversión de capital.

Interdisciplinariedad de la tribología

Varios han sido los intentos de unificar el pensamiento en Tribología; sin embargo, subsisten divisiones filosóficas, las cuales son llevadas a los libros y diferentes publicaciones existentes en esta Ciencia. En los últimos tiempos estas divisiones pueden ser enumeradas como divisiones en instituciones académicas, cuyos cuatro desenvolvimientos fundamentales son:

- a) Mecánica de los sólidos. Esta se ocupa del análisis matemático de los esfuerzos de contacto y las variaciones de temperatura que experimentan las superficies rozantes.
- b) Mecánica de los Fluidos. Se ocupa del análisis matemático del comportamiento de los fluidos lubricantes en las diversas formas de las superficies deslizantes. Es la división más avanzada en lo concerniente a modelación.
- c) Ciencia de los Materiales. Se ocupa de los mecanismos a escala atómica y microescala de la degradación o alteración de las superficies durante el frotamiento.

d) Química. Se ocupa de la reacción entre los lubricantes y las capas superficiales, así como entre superficies diferentes en contacto.

En cada una de estas divisiones se ha llevado a cabo una serie de trabajos muy detallado y profundo, por lo que cada una requiere años de estudio y de preparación académica. Es por ello que lo mejor es la formación de equipos multidisciplinarios para la investigación y el desarrollo de cada problema práctico.

Beneficios de la tribología

La maquinaria moderna se proyecta para trabajar a velocidades y tensiones cada vez mayores, lo cual obliga a una cuidadosa consideración de los fenómenos que se presentan en las superficies con movimiento relativo. Este proceso no es único de las maquinarias o elementos de las mismas.

En todos los países industrializados se han conformado Comités Técnicos, Asociaciones u otros dispositivos para viabilizar la introducción de la Tribología, así como actualizarse sobre las diferentes nuevas tecnologías que en el mundo van surgiendo. En general, la aplicación de la Tribología logra los siguientes beneficios:

- Aumento de la Productividad
- Reducción de las fallas mecánicas en los equipos.
- Mayor Confiabilidad en los Procesos
- Incremento en la vida útil de los equipos
- Mayor eficiencia
- Reducción de Costos
- Reducción del desgaste en equipos
- Reducción del Consumo de Energía por disminución de la fricción. 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.
- Beneficios medio ambientales.

Ramas de la tribología

Tribociencias. Rama de la Tribología que se encarga del estudio y realización de investigaciones fundamentales sobre los procesos que tienen lugar en las superficies en contacto y movimiento relativo e incluye: La tribofísica, la Triboquímica, la

Tribomecánica y la tribometalografía. Adicionalmente se aplican la Tribotécnica y la Tribotecnología.

Tribología en la educación

Hoy no existe una carrera con contenidos mecánicos, ni maestrías, con este perfil, que no incluyan en sus currículos asignaturas y conocimientos en la materia. Este aspecto está también presente en las universidades cubanas, siendo parte de investigaciones científico técnicas y de publicaciones científicas.

CONCLUSIONES

La Tribología es una ciencia que ha tenido un vertiginoso desarrollo en sus principios y conocimientos, en su aplicación y en el aspecto científico.

Esta ciencia ha conllevado el surgimiento de varias ramas científico técnicas, tales como: el Tribodiseño, a tribotermodinámica, la ingeniería de superficies, la tribotecnología.

La Tribología es una ciencia multidisciplinaria. Sus numerosas ramas hacen difícil su aplicación por una sola persona. Es por eso que resulta indispensable el trabajo en grupos' Esta ciencia está presente en todos los currículos de carreras de perfil mecánico e industriales, así como en sus maestrías.

BIBLIOGRAFÍA

Martínez F. (1994). Tribología. Ciencia y Técnica para el Mantenimiento, Editorial Noriega, México.

Universidad de Navarra (2013). Introducción a la lubricación, CAMPUS TECNOLÓGICO, TECNUN, España.

Martínez F. (2010). Tribología Integral. Editorial Noriega, México.

Fernández E. (1980). Tribología, Universidad Central de las Villas.

Jost h. P. (1991). "Tribology. Origin and Future", Wear V 136, N1, P 1-17, Cambridge.

B Bhushan y B Gupta. (1991) Handbook of Tribology. Chapter 4. New York: McGraw-Hill.

Martínez F. (2017), Mantenimiento Industrial. Conceptos y Aplicaciones.

Editora MINAZ.

Martínez F. (2022). Surface Engineering. Application on wear. *Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 31 (4), 2022.

Declaración de conflicto de interés

No existe conflicto de interés entre los autores del artículo.

Contribución de los autores

Francisco Martínez Pérez: redacción del documento, revisión de la bibliografía, y revisión en estilo y forma del documento.

Alejandra García Toll: redacción del documento, revisión de la bibliografía, y revisión en estilo y forma del documento.