

Consideraciones sobre el desgaste desde la óptica de la complejidad.

Ania González Mora

Dpto. de Física. Facultad de Electromecánica. Universidad de Camagüey.

email: aglez@em.reduc.edu.cu

Resumen

En el trabajo se trata de establecer una relación entre el fenómeno del desgaste y la teoría de la complejidad, analizando desde este nuevo enfoque la razón por la que el desgaste no posee un cuerpo de conocimientos que permita la predicción de la vida útil de un sistema tribológico en uso. Debido a la diversidad de variables y a las múltiples interacciones que intervienen en el proceso, ligado esto al tratamiento reduccionista con que hasta ahora se han tratado los problemas ingenieriles, el hombre aún está lejos de controlar el desgaste, fenómeno clave en el desarrollo económico de un país.

Palabras claves: desgaste, tribología, complejidad.

Abstract

In the work it is to establish a relationship between the phenomenon of the wear and the theory of the complexity, analyzing from this new focus the reason for which the wear doesn't possess a body of knowledge that allows the prediction of the useful life of a tribologic system in use. Due to the diversity of variables and to the multiple interactions that intervene in the process, bound this to the reductionist treatment with which up to now they have been the engineering problems, the man is still far from controlling the wear, key phenomenon in the economic development of a country.

Key words: wear, tribology, complexity

Introducción

La palabra Tribología se usó por primera vez en Inglaterra en 1966. El neologismo proviene de las palabras griegas “tribo” y “logos”, fricción y estudio, y se designa así a la rama de la mecánica que dedica sus esfuerzos al estudio de las superficies friccionantes con movimiento relativo entre ellas. La tribología comprende los procesos de fricción, desgaste y lubricación de los cuerpos en contacto y que anteriormente se trataban independientemente unos de otros. La proyección, construcción y explotación de máquinas y equipos sin tener en cuenta la interacción de estos tres procesos lleva a que los sistemas mecánicos se caractericen por pérdidas considerables de energía, grandes períodos improductivos, alto consumo de materiales, piezas de repuesto y combustible, además de hacer costosas las reparaciones y el mantenimiento.

El estudio del desgaste junto con los estudios de la fricción y la lubricación pretende proveer al hombre de un cúmulo de conocimientos que le permitan economizar y ahorrar los recursos materiales que para su uso posee, así como optimizar la utilización de las máquinas y elementos de máquinas. El desgaste es un fenómeno en el que intervienen múltiples variables que se interrelacionan entre sí, dando como resultado que hasta la fecha no se haya logrado establecer una ley matemática universal que rijan la dependencia de la tasa del desgaste, con todos los parámetros influyentes.

El desgaste es consecuencia directa del uso. No se concibe el uso sin desgaste, por mínimo que este sea. Ni siquiera los objetos inmóviles, como por ejemplo los construidos para ser admirados, son inmunes a este fenómeno (monumentos en general). Estos objetos, que parece que no interactúan con otros, son constantemente golpeados y desgastados por pequeñas partículas suspendidas en el viento, por las gotas de lluvia y por una combinación de su propio peso y los efectos antes mencionados. El fenómeno del desgaste está considerado como uno de los problemas industriales más comunes, causante del deterioro de los elementos de máquinas. En comparación con otros fenómenos la investigación del desgaste está en franca desventaja en relación a la comprensión general del fenómeno y a la posibilidad de establecer buenas correlaciones entre los ensayos de laboratorio y la práctica industrial. El desgaste no tiene constituido un cuerpo de conocimientos racional, que permita predecirlo con cierto grado de exactitud.

Debido al gran número y diversidad de variables que intervienen en el fenómeno, aunque

hasta la fecha se ha generado una gran cantidad de información experimental, no existen patrones generales que permitan anticipar cómo se va a comportar un determinado sistema en un caso real. Este complejo panorama de variables asociadas al fenómeno del desgaste, ha tenido una influencia determinante en la orientación de las investigaciones. Los trabajos sobre el desgaste se pueden agrupar en tres grandes áreas:

1. Los que tratan de obtener una comprensión general del problema con miras a desarrollar modelos matemáticos o patrones generales, que permitan postular leyes del desgaste.
2. Los que se dedican a estudiar un aspecto particular, por ejemplo, el efecto de una variable sobre la resistencia al desgaste.
3. Los que intentan producir información para el uso mas o menos directo, por parte de diseñadores e Ingenieros de Mantenimiento.

En la literatura se refleja una preponderancia de los dos primeros puntos. Aunque se produce mucha información, ésta es fragmentada y de difícil aplicación o generalización.

Casi todos los sectores de nuestra economía dependen de la reposición de elementos de maquinas desgastados. Actualmente parece más razonable dirigir los esfuerzos a lograr tiempos de vida útil prolongados, en lugar de la fabricación intensiva de piezas de repuesto. Desde que surge la Tribología como rama de la ciencia, se integraron disciplinas tales como la mecánica, la física, el diseño, la metalografía, etc., sin embargo, en el espacio multidisciplinario donde se pretende resolver los problemas existentes, ha señoreado la percepción ingenieril en cuanto a métodos y enfoques, dando como resultado la excesiva subdivisión en el tema. La división del desgaste y clasificación en tipos, lejos de simplificar el proceso de obtención de una solución, lo ha complicado. El desgaste es un fenómeno complejo y por lo tanto necesita una visión diferente, otro enfoque. En este trabajo se pretende hacer ver la necesidad del otro enfoque, pensando en la ciencia no lineal como el nuevo camino a seguir. La idea ahora es integrar, realizar un tratamiento holístico.

Desarrollo

I. El desgaste: enfoque tradicional.

El desgaste se ha subdividido tomando como referencia el mecanismo predominante. Siguiendo un autor cualquiera la clasificación de tipos de desgaste sería abrasión, adhesión, erosión, desgaste micro-oscilatorio (fretting), desgaste químico, etc. Es bien conocida la no coincidencia de los resultados experimentales con los teóricos y la gran dispersión de los resultados experimentales, según las relaciones empíricas expuestas por renombrados científicos de la talla de Tabor, Boden, Archard, etc.

Para explicar la dinámica del desgaste existe un modelo cualitativo realizado por Horst Czichos. Se basa en la curva típica del desgaste de metales en función del tiempo, la cual divide en 3 zonas, según el gráfico de la figura 1.

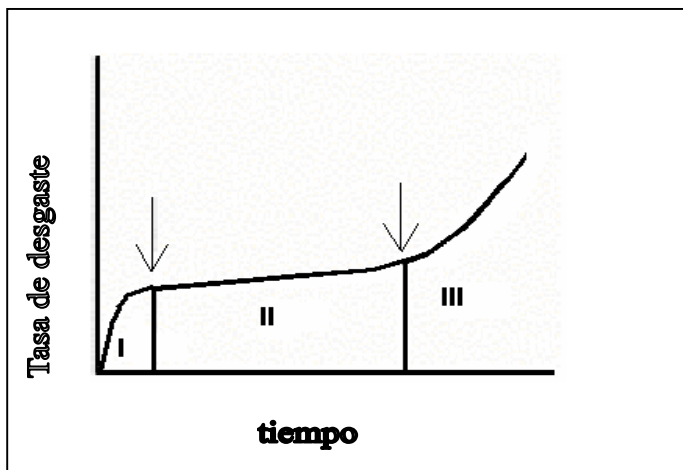


Figura 1: Comportamiento funcional típico de la tasa de desgaste en metales en función del tiempo.

A. Período de asentamiento. Zona I.

Ocurre al ponerse en contacto por primera vez dos superficies en movimiento relativo. Alta velocidad del desgaste, en este período el contacto se produce en los picos más altos de la rugosidad de las superficies en contacto, generando altas presiones y deformaciones. Con el tiempo el área real de contacto aumenta, así disminuye la velocidad de desgaste.

$$\frac{dW}{dt} = C_1 \frac{1}{W} \Rightarrow W(t) \propto \sqrt{t}$$

de desgaste.

aquí W es la magnitud que caracteriza la tasa

B. Período de desgaste normal. Zona II.

Estado cuasiestacionario que se caracteriza porque la pérdida por desgaste en la unidad de tiempo, permanece constante.

$$\frac{dW}{dt} = const \Rightarrow W(t) \propto t$$

C. Período de desgaste catastrófico. Zona III.

Se generan grandes cargas dinámicas, aumenta la temperatura, el nivel de ruido y de las vibraciones. El sistema va directo a la rotura.

$$\frac{dW}{dt} = CW \Rightarrow W(t) \propto e^t$$

El gráfico se dividió en segmentos donde en cada uno se supone una forma funcional distinta, sin embargo, los puntos señalados con flechas se soslayan y son los que más información aportan. Esos puntos señalan donde el sistema cambia de dinámica y varía totalmente su comportamiento, lo cual puede apreciarse cualitativamente en la descripción de cada período. Si se lograra conocer esos dos puntos, el problema del desgaste estaría resuelto, pues esos puntos definen el tiempo de vida útil. Para cada par tribológico no se puede construir un gráfico permanente como el de la Fig. 1, aun en el caso de materiales idénticos. Si el sistema trabaja en otro régimen, con otros parámetros operacionales, o en otro entorno, la intensidad del desgaste variará sustancialmente. Así vemos cuan sensible es el sistema a las condiciones iniciales. Esto hace que falle la posibilidad de pronóstico.

El desgaste es un fenómeno de las superficies en contacto, sin embargo, los cambios más importantes que ocurren en los materiales, que lo llevan a la falla catastrófica, se generan bajo la superficie, en un pequeño volumen. En esta capa se van acumulando cambios, asociados a movimientos cíclicos que ocurren a escala superficial y que facilitan la formación y desarrollo de grietas, provocando pérdidas de material al salir a la superficie. Inicialmente, todo el volumen posee las mismas características, (mecánicas, térmicas, etc.). Con el tiempo, debido a las condiciones propias del uso (carga, temperatura, estados tensionales) en una fina capa subsuperficial va a ocurrir cambios que provocan la pérdida de coherencia con la matriz, debido a la pérdida de cristalinidad.

Esto se debe a la migración de defectos hacia puntos concentradores de tensiones, precipitaciones, difusión, formación de nuevos defectos, deformación de la red, cambios de fases, desarrollo y crecimiento de grietas, etc.

II. El desgaste: nuevo enfoque.

El hombre utiliza los materiales para su desarrollo y comodidad, por tanto necesita saber cuanto tiempo puede explotarlos sin necesidad de reponerlos. Si se trazara el gráfico 1 punto a punto, hasta la rotura, no se resolvería nada. El conocimiento de la historia particular de un par friccionante no permite predecir la historia de otro, aún del mismo material pues puede suceder algo totalmente diferente con solo variar las condiciones del entorno. El conocimiento de la ley del movimiento del proceso de desgaste es lo que permitirá la predicción del tiempo de vida útil en función de los parámetros que caractericen de manera adecuada el proceso de desgaste, sin embargo debemos considerar que los viejos métodos usados, que siguen la idea de subdividir para luego integrar el resultado no ha tenido éxito en la búsqueda de esa ley de movimiento.

Un material en uso puede ser considerado un sistema en movimiento en un espacio de posibilidades. En dependencia del valor que tomen las variables estructurales, operacionales y de interacción, el sistema pasará a un estado u otro. El movimiento de un sistema que sufre el proceso de desgaste no es periódico, por tanto no es fácilmente predecible en el tiempo. El movimiento de los sistemas con cierto grado de complejidad puede llegar a ser muy simple, sin embargo, el estudio del desgaste de un par tribológico en explotación, que aparentemente no presenta dificultades, puede convertirse en todo un reto. El desgaste es un fenómeno eminentemente no lineal y toda evidencia de ello hace pensar que se ubica dentro de los mas complejos de la Tribología, por lo tanto seguir patrones tradicionales no nos llevará a obtener una ley que permita el pronóstico deseado. El desgaste debe ser considerado holísticamente, sin obviar o prescindir de ninguna variable. Primero debe establecerse un modelo físico para luego llegar al modelo matemático.

Modelo físico:

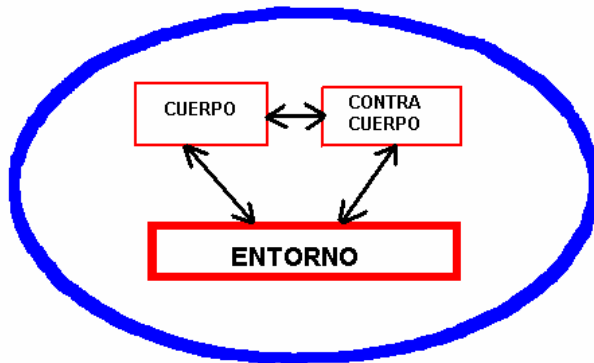


Figura 2: Modelo físico del desgaste. (simplificado)

Las superficies de los materiales interactúan entre si y con el entorno, esto hace que se modifique la topología, por tanto variará la forma en que se distribuye superficialmente la masa. Puede haber remoción o acomodamiento.

Considerando el esquema anterior se puede plantear el siguiente modelo matemático:

$$\frac{df(m_1)}{dt} = f_1(\xi, \delta, t)$$
$$\frac{df(m_2)}{dt} = f_2(\xi, \delta, t)$$
$$\frac{dg(m_3)}{dt} = F(f_1, f_2)$$

donde $f(m)$ representa la distribución de masa de cada cuerpo y $g(m)$ caracteriza la pérdida que sufren los cuerpos, es decir, la formación de partículas de desgaste.

ξ : magnitudes asociadas a los cuerpos (rugosidad, dureza, coeficiente de fricción, tipo de material (módulo de Young), carga, velocidad de deslizamiento, etc.)

δ : magnitudes asociadas al entorno (temperatura, humedad relativa, contaminantes (lubricación, agresividad del medio), etc.)

La tasa de desgaste es muy susceptible si se cambian algunos de estos parámetros. Pequeños cambios en las condiciones del entorno de un material en uso puede conllevar a cambios drásticos en la intensidad del desgaste e incluso a un salto brusco en la dinámica del fenómeno. Se dice entonces que el sistema sufrió una bifurcación, rasgo

distintivo de un sistema que transita del orden al caos.

La figura 3 muestra tres posibles respuestas de un mismo sistema, a modo de ejemplo, en dependencia de la agresividad del medio. Si el medio se pasiva, puede que el material alargue su tiempo de vida útil alargando su región II, como se muestra en la gráfica marcada 1, suponiendo que el material esté fabricado para un comportamiento como se muestra en la gráfica sin numerar. Si la ley dinámica varía según el gráfico 2 eso significaría un aumento en la agresión del entorno hacia el sistema. Por ultimo, si el comportamiento es según 3, estamos en presencia de un medio tan agresivo que el sistema tiende a la rotura rápidamente, reduciendo casi a la mitad su tiempo de vida útil.

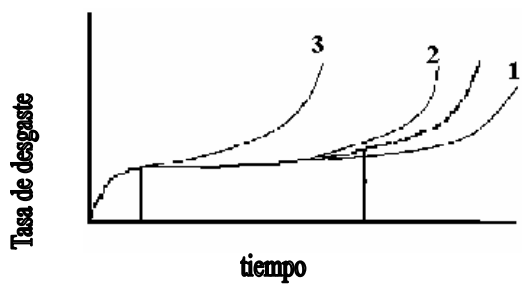


Figura 3: Ejemplo de posibles dinámicas de desgaste en función de las condiciones del entorno.

En este ejemplo el sistema no solo puede presentar cambios en las zonas I y II sino desde el propio período de asentamiento. De hacer el experimento para condiciones controladas del entorno, referirnos a los parámetros estructurales u operacionales provocarían más variación en las zonas que las ejemplificadas.

Encontrar las funciones f y g del sistema de ecuaciones diferenciales propuesto, exige un proceso de modelación. El desarrollo de este modelo requiere del cuerpo de conocimientos teóricos de la ciencia no lineal.

De todos los paradigmas de la ciencia no lineal (estructuras coherentes, patrones y configuraciones complejas, caos determinista y fractales) solo los fractales han penetrado en la ciencia de los materiales y han encontrado una amplia difusión y aplicación en el estudio de la geometría no euclidiana de los objetos naturales que allí se encuentran, tales como grietas, superficies rugosas, microestructuras, etc. A pesar de saber que el desgaste no es una propiedad intrínseca de los materiales, si sabemos que todos llevan en si, desde su nacimiento, la información de cual será su comportamiento en dependencia de cuales sean los parámetros de interacción y operacionales durante el tiempo de uso. Esta información se encuentra residente en el tipo de red cristalina y

átomos que conforman el material, porcentaje de aleación con otros elementos, incluyendo las impurezas, modo de obtención de la pieza, tipo de tratamiento térmico o termoquímico que recibió como acabado.

Conclusiones

El desgaste es un fenómeno complejo, dos superficies planas en contacto y movimiento relativo, con o sin lubricación, es un sistema que depende de muchas variables, las cuales se agrupan usualmente en “operacionales” y “estructurales”. Algunos autores consideran un tercer grupo que denominan parámetros de interacción, donde se agrupan las variables de fuerza, energía disipada, tensiones de contacto, etc. Cada variable de cada grupo interactúa dinámicamente con las demás, por ejemplo, el coeficiente de fricción depende del tipo de material, de su dureza, del tipo de lubricante, mientras que según su valor se estima parte de la energía disipada en forma de calor y el calentamiento de los elementos de máquina que conforman el sistema tribológico. A su vez la elevación de la temperatura puede provocar cambios en la microestructura, alterar la dureza, ocasionar la formación de precipitados, lo que puede alterar el coeficiente de fricción. Es decir, entre las variables existe una interdependencia que a veces es física solo debida al contacto, como es el caso del cambio de rugosidad por el rozamiento, pero otras veces es traspaso de información entre partes del sistema. Estas interacciones obviamente no son lineales por lo que al estudiarlas por separado para luego integrarlas perdemos parte importante de lo que sucede, no situamos al sistema en su condición real. Un sistema tribológico es, por tanto, un sistema abierto, disipativo, debido a sus relaciones no despreciables entre las partes y con el entorno.

El análisis reduccionista que hasta ahora ha resuelto muchos problemas en el campo de la ingeniería, ahora no sirve. Seguir la estrategia cartesiana de ir de lo simple a lo complejo, lejos de arrojar luz a la realidad, nos sitúa lejos de la explicación satisfactoria pues el resultado que se obtenga puede ser un conjunto de relaciones reversibles, deterministas solo aplicables a casos muy particulares.

Referencias bibliográficas

- Archard J.F. Journal of Applied Physics. Vol. 24, 8, 1953
- Bassani R, D'Acunto M. Proceedings of the II Conference on Energoagnostika and Condition Monitoring. Moscow. Vol. 3, 2, 1999.
- Emilio Álvarez. Tribología. Santa Clara. UCLV. 1992.
- Halling J. Journal of Lubrication Technology. Vol. 105, 2, 1983.
- Introduction to Chaos. <http://www.upscale.utoronto.ca>
- Jorge L Suárez. Tesis de Maestría. ISPJAE. 1996.
- J. Virgilio Niño. Acerca de la complejidad y el rompimiento de la simetría. Ed. El Bosque. 1999, p 27-38.
- Klamecki B. E. Wear. 58, 1980
- Polzer G. Fundamentos de la fricción y el desgaste. MIR. Moscú 1984
- Prigone Ilya. El fin de las certidumbres. Ed. Taurus. 1997 p 117
- Rabinowicz E. Wear. 100, 1984.
- Rabinowicz E. Journal of Lubrication Technology. Vol. 113, 2, 1981
- Rosenfield A.R. Scripta Metallurgica et Materialia. Vol. 24, 5, 1990
- The Chaos Hipertext book. <http://www.hipertextbook.com>
- Vázquez Juan C. Trabajo de Ascenso. UCV. Caracas. 1986.
- Vázquez J.C. Proceedings of the fourth National Thermal Spray Conference. Pittsburgh. PA. USA. 1991
- Xiangjun Qiu, Plesha M. E. Journal of Tribology. Vol. 113, 3, 1991
- Yoshitsugu Kimura. J.Phys. D: Appl.Phys. 25, 1992. Special Issue.