

Pronóstico de la fiabilidad de componentes mecánicos sometidos a desgaste



Jaime Angulo-Zevallos*
Carlos Castellote-Varona*
Mohammad Alanbari*

Dr. Ingeniero Industrial
Ingeniero Mecánico
Dr Ingeniero Industrial

* Universidad Europea de Madrid. Departamento de Electromecánica y Materiales, c/ Tajo, s/n Urb. El Bosque - 28670 Villaviciosa de Odón (Madrid). Tfno: + 34 915 628770;
jaime.angulo@uem.es, carlos.castellote@uem.es, alanbari@uem.es

Recibido: 03/05/2010 • Aceptado: 14/06/2010

Forecast of reliability for mechanical components subjected to wearing

ABSTRACT

• Generally, improving quality and price of products, obtaining a complete customer satisfaction and achieving excellence in all the processes are some of the challenges currently set up by every company. To do this, knowing frequently the reliability of some component is necessary.

To achieve this goal, a research, that contributes with clear ideas and offers a methodology for the assessment of the parameters involved in the reliability calculation, becomes necessary.

A parameter closely related to this concept is the probability of product failure depending on the operating time. It is known that mechanical components fail by: creep, fatigue, wear, corrosion, etc. This article proposes a methodology for finding the reliability of a component subject to wear, such as brake pads, grinding wheels, brake linings of clutch discs, etc.

• **Key words:** Testing life, Wear, Reliability, Failure.

RESUMEN

Generalmente, mejorar la calidad y el precio de los productos, obtener la satisfacción total de los clientes y alcanzar la excelencia en todos los procesos son algunos de los desafíos que fijan actualmente cualquier compañía. Para ello, se hace necesario conocer con frecuencia la fiabilidad de algún componente.

Se hace así necesaria una investigación que contribuya con claridad de ideas y proponga una metodología para la valoración de los parámetros que intervienen en el cálculo de la fiabilidad. Un parámetro muy relacionado con este concepto es la probabilidad de fallo del producto en función del tiempo de funcionamiento. Se sabe que los componentes mecánicos fallan por: fluencia, fatiga, desgaste, corrosión, etc. El artículo actual propone una metodología para hallar la fiabilidad de un componente sometido a desgaste, como, por ejemplo, pastillas de freno, muelas abrasivas, forros de discos de embrague, etc.

Palabras clave: Vida acelerada, Desgaste, Fiabilidad, Fallo.

1. INTRODUCCIÓN

Los componentes mecánicos de una máquina (rodamientos, ejes, bielas, levas, engranajes, embragues, etc.) presentan diferentes causas de fallo, ya sea por fluencia, fatiga, desgaste, corrosión, etc. El presente artículo se centra solo en el caso de componentes sometidos a desgaste, dejando los casos de fluencia, fatiga, corrosión, etc. para estudios futuros.

El modelo propuesto permite, a partir de una primera medición de desgaste de un componente, pronosticar su probabilidad de fallo en función del tiempo [1]. Esto será útil para casos como discos de desbaste, lijas, forros de discos de embrague, pastillas de freno, cuchillas de torno, etc.

El desgaste es la pérdida de material superficial en elementos que se encuentran en contacto con movimiento relativo entre sus superficies. Diseñadores e ingenieros, que deben tomar decisiones óptimas en situaciones donde las condiciones tribológicas son importantes, necesitan conocer cuánto durará un componente específico. Para resolver esta cuestión se han desarrollado muchos modelos

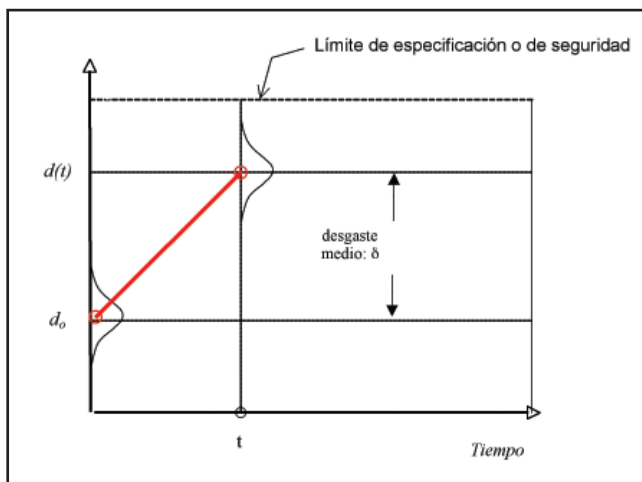
El gráfico superior (a) muestra el **DESGASTE ACUMULADO** en el eje vertical frente al **TIEMPO** en el eje horizontal. La curva de desgaste se divide en tres etapas: **desgaste severo** (inicio), **desgaste ligero** (intermedio) y **desgaste insignificante** (final). Se marcan dos niveles de desgaste: el **nivel crítico de desgaste** y el **desgaste catastrófico**. El **tiempo de vida** se indica como el intervalo desde el inicio hasta el punto de desgaste catastrófico.

El gráfico inferior (b) muestra la **FRICCIÓN** en el eje vertical frente al **TIEMPO** en el eje horizontal. La curva de fricción comienza con un aumento, se estabiliza, luego disminuye y finalmente aumenta de nuevo. Se indica el **nivel crítico de fricción** como una línea horizontal de referencia. El **tiempo de vida** se indica como el intervalo desde el inicio hasta el punto donde la fricción alcanza el nivel crítico.

Es importante, por tanto, si se pretende calcular la fiabilidad, el obtener resultados y métodos tribológicos con los cuales el tiempo de vida útil pueda ser estimado. El tiempo de vida útil en diseño es el tiempo hasta que el límite de desgaste acumulado en la vida operativa, señalado en las especificaciones de diseño, es superado en operación. Similarmente, el cambio en las condiciones de contacto puede terminar por reducir el tiempo de vida cuando un incremento en las fuerzas de fricción supera los valores de las especificaciones de diseño, el nivel de fricción crítico, aumentando drásticamente los riesgos en operación.

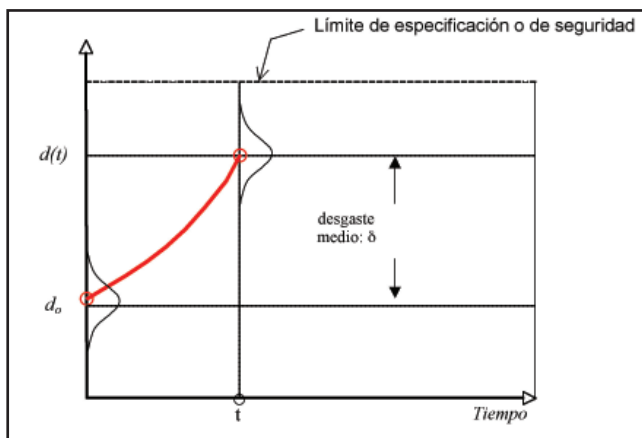
Hay varios modelos de desgaste para los elementos mecánicos: un modelo describe un comportamiento lineal y el otro presenta diversas formas de desgaste no lineal. Además de estos dos casos está el del desgaste debido a la fatiga.

Este caso se refiere a elementos de sección uniforme sometidos a desgaste, como pastillas de freno o similares.



d_o : Valor medio inicial de desgaste
 $d(t)$: Valor medio de desgaste total al cabo de un tiempo t .

Este caso se refiere a elementos de sección variable como discos de corte, muelas de esmeril, elementos de forma piramidal, etc.



El valor medio δ que se aprecia en las Figuras 2 y 3 representa el desgaste producido entre 0 y t , y es el resultado de la medición de los desgastes de “ n ” elementos en ese periodo de operación.

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n (d_i - d_o)}{n} \quad (1)$$

Donde:

d_i : Representa el valor de desgaste de un componente i al cabo del tiempo de ensayo t

Para ambos casos se deben considerar dos desviaciones típicas:

- La correspondiente al valor original de desgaste d_o (característica medida), cuya desviación típica será σ_o
- La influencia de la degradación de la característica con el tiempo que produce, al cabo de un tiempo t , una desviación típica σ_t .

La correspondiente desviación típica σ_d para un desgaste acumulado $d(t)$ será:

$$\sigma_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \delta)^2}{n-1}} \quad (2)$$

Luego el efecto total de las dos desviaciones típicas independientes es una σ_t , tal que:

$$\sigma_t = \sqrt{\sigma_o^2 + \sigma_d^2} \quad (3)$$

Dependiendo de la geometría del elemento mecánico sometido a desgaste, la curva de desgaste de la Figura 3 obedecerá a un modelo matemático distinto.

En el presente trabajo solo nos centraremos en el caso de un elemento circular sometido a desgaste radial como discos de corte, discos de desbaste, muelas de esmeril, etc.

3. MODELO MATEMÁTICO DE DESGASTE PARA ELEMENTOS CIRCULARES GIRATORIOS SOMETIDOS A DESGASTE RADIAL

Para el caso de discos de desbaste el comportamiento de desgaste no es lineal, obedece a un comportamiento parabólico en función a la geometría del disco.

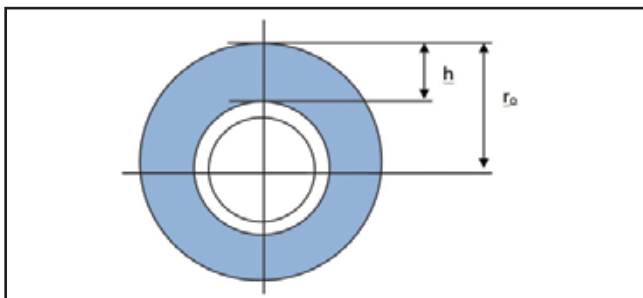


Figura 4: Disco giratorio sometido a desgaste radial

Donde:

h : Espesor de material (valor máximo de desgaste, incluido el límite de seguridad).

r_o : Radio geométrico inicial del disco.

Para elementos circulares giratorios sometidos a desgaste radial el tipo de desgaste es parabólico tal como se aprecia en la Figura 3.

El problema está en calcular una expresión matemática para el modelo de desgaste. Para poder realizar esto, partiremos de un espesor de desgaste inicial (e_1), y construimos un triángulo donde la base representa al perímetro de desgaste.

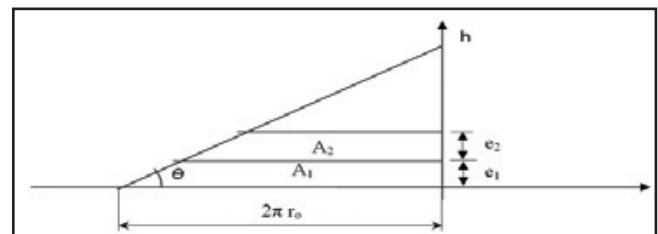


Figura 5: Desgaste del disco en función del perímetro de desgastado

Cuando un disco efectúa una operación de desgaste en un tiempo t obtendremos un desgaste e_1 , y, cuando se vuelva a efectuar la segunda operación empleando el mismo tiempo, el disco se gastará un espesor e_2 (un poco más que e_1). Eso es porque el volumen de desgaste empleado en la primera pasada (V_1) será igual al volumen de la segunda pasada (V_2), siempre y cuando se emplee el mismo tiempo de operación.

Si: $V_1 = V_2$
Entonces $A_1 = A_2$

$$\tan \theta = \frac{h}{2\pi r_o}$$

El área del trapecio A_1 será:

$$A_1 = 2\pi \cdot r_o \cdot \left[1 - \frac{0,5 \cdot e_1}{h} \right] \cdot e_1 \quad (4)$$

Y el del trapecio A_2 será:

$$A_2 = 2\pi \cdot r_o \cdot \left[1 - \frac{e_1}{h} - \frac{0,5 \cdot e_2}{h} \right] \cdot e_2 \quad (5)$$

Igualando las expresiones (4) y (5) y resolviendo, obtenemos la expresión del espesor e_2 en función del espesor e_1

$$e_2 = (h - e_1) - \sqrt{2(e_1 - h)^2 - h^2} \quad (6)$$

Se puede generalizar la expresión (6) para pronosticar los futuros espesores de desgaste.

$$e_{i+1} = (h_i - e_i) - \sqrt{2(e_i - h_i)^2 - h_i^2} \quad (7)$$

La expresión (7) es válida si se consideran tiempos iguales de operación de desgaste.

Con estos valores se puede construir la verdadera curva de desgaste en función al tiempo (que será de tipo parabólico expresado en la Figura 3).

4. PREDICCIÓN DE LA FIABILIDAD

La fiabilidad es una característica de un dispositivo expresada mediante la probabilidad de que éste lleve a término una función determinada, según unas condiciones dadas y durante un tiempo determinado.

Dentro del periodo de vida útil de un dispositivo la función de fiabilidad $R(t)$ se expresa como: $e^{-\lambda t}$, donde λ representa la tasa de fallos del dispositivo dentro de su periodo de vida útil, y t es el tiempo de evaluación de la fiabilidad. Hay otro valor denominado *MTBF* (*Mean Time Between Failure*), que es el tiempo medio entre fallos del dispositivo y que, matemáticamente, es la inversa de la tasa de fallos: $1/\lambda$.

Actualmente se utilizan sensores que nos permiten pronosticar el MTBF (*Mean Time Between Failure*) y con este valor pronosticar la fiabilidad de componentes mecánicos. Además los datos aportados por estos sensores permiten calcular la vida útil restante de un componente y permiten predecir el tiempo más económico para el reemplazo del mismo; esta información es útil para tareas de mantenimiento predictivo. Como ejemplos tenemos:

- Sensores de vibraciones por ultrasonido
- Analizadores de vibraciones en rodamientos
- Sensores laser de vibraciones en equipos rotativos
- Acelerómetros, etc.

Cuando no se tienen datos históricos de fallo, el fabricante realiza ensayos de vida acelerada para pronosticar la fiabilidad del producto y a partir de esos datos obtiene la probabilidad de fallo.

La predicción de la fiabilidad para equipos mecánicos es complicada debido a que intervienen tres factores:

- El desgaste natural¹
- La interacción del maquinista (o manipulador del equipo)
- Las variaciones medioambientales

Lo cual nos conduce muchas veces a rediseñar y ensayar los componentes.

Para equipos mecánicos, existe poquísima información disponible y organizada de cara a una metodología de predicción coherente. Los fenómenos de desgaste, la inconsistencia de materiales, los ambientes internos y externos (tales como en sistemas hidráulicos) y la variedad de diseños, dificultan en gran medida en el desarrollo de métodos de predicción de la fiabilidad mecánica.

Para calcular la fiabilidad de componentes sometidos a desgaste se puede aplicar la distribución de *Weibull*.

$$R(t) = \exp\left[-(t/\eta)^\beta\right] \quad (8)$$

Donde:

β : Parámetro de forma

η : Parámetro de escala

Donde el parámetro de forma β es un valor importante porque nos dice en qué parte del ciclo de vida del elemento en cuestión estamos: si β es menor que uno, estamos en el periodo de fallos infantiles; si β es igual a uno, estamos en el periodo de fallos aleatorios o de vida útil; si β es mayor que uno, estamos en el periodo de fallos de desgaste. El parámetro η representa el tiempo de vida característica del elemento o dispositivo.

Un criterio para pronosticar el MTBF (*Mean Time Between Failure*) es el aplicado por la referencia [1], donde el valor del MTBF se puede calcular en función del valor límite del desgaste recomendado por el fabricante como se ven en las figuras 1 y 2 (*Límite de especificación o de seguridad*).

EJEMPLO:

Hallar la fiabilidad de una muela de esmeril para desbaste de uso general de 300x20x32

El diámetro exterior es 300 mm y el diámetro mínimo de corte recomendado por el fabricante es 70 mm.

¹ Es importante conocer el proceso de desgaste que rige a los materiales por tres motivos:

Para conocer la duración de los materiales, para conocer el consumo de energía, y de cara a la seguridad de los sistemas mecánicos



Figura 6: Disco de desbaste de 300x20x32

Para calcular el desgaste no serán necesarios ensayos de vida acelerada, porque se pueden obtener resultados con ensayos de vida normales.

De 10 discos ensayados se obtuvieron los siguientes resultados de desgaste después de un ensayo de 5 minutos de desbaste, con las mismas condiciones de operación en una amoladora de 2400 RPM.

Resultados del primer ensayo:

Disco	Radio inicial (mm)	Radio final (mm)	Desgaste (mm)
1	150	146,5	3,5
2	150	144,8	5,2
3	150	144,7	5,3
4	150	145,4	4,6
5	150	146,2	3,8
6	150	145,6	4,4
7	150	145,9	4,1
8	150	144,1	5,9
9	150	143,9	6,1
10	150	146,2	3,8

Aplicando la expresión (1) obtenemos el desgaste medio $\delta_1 = 4,67$ mm

Aplicando la ecuación (2) obtenemos la desviación típica

$$\sigma_1 = 0,914 \text{ mm}$$

Aplicando la expresión (7), con los datos iniciales obtenemos a priori el espesor e_2

$$e_2 = (70 - 4,67) - \sqrt{2(4,67 - 70)^2 - 70^2}$$

$$e_2 = 5,03 \text{ mm}$$

No obstante, el ensayo se volvió a repetir con los mismos discos durante 5 minutos más empleando las mismas condiciones de operación y los resultados fueron los siguientes:

Resultados del segundo ensayo:

Disco	Radio inicial (mm)	Radio final (mm)	Desgaste (mm)
1	146,5	141,8	4,7
2	144,8	139,5	5,3
3	144,7	139,2	5,5
4	145,4	140,6	4,8
5	146,2	141,1	5,1
6	145,6	140,9	4,7
7	145,9	141,5	4,4
8	144,1	138,1	6
9	143,9	138,6	5,3
10	146,2	141,5	4,7

Aplicando la expresión (1) obtenemos el desgaste medio $\delta_2 = 5,05$ mm, prácticamente igual al valor teórico obtenido 5,03 mm.

Aplicando la ecuación (2) obtenemos la desviación típica

$$\sigma_2 = 0,859 \text{ mm}$$

Ahora sí habría que aplicar la expresión (3), ya que se ha producido un desgaste inicial.

$$\sigma_t = \sqrt{(0,914 \text{ mm})^2 + (0,859 \text{ mm})^2} = 1,254 \text{ mm}$$

Aplicando la expresión (8) se obtienen los valores de desgaste futuros.

i	h_i (mm)	e_i (mm)	e_{acum} (mm)	t (min)
1	70,00	4,67	4,67	5
2	65,33	5,03	9,70	10
3	60,30	5,49	15,19	15
4	54,81	6,10	21,29	20
5	48,71	6,99	28,28	25
6	41,72	8,42	36,71	30
7	33,29	11,46	48,17	35

Para este caso, solo se permite hacer siete operaciones de desbaste, no da para una octava, porque la expresión (8) nos da una raíz negativa.

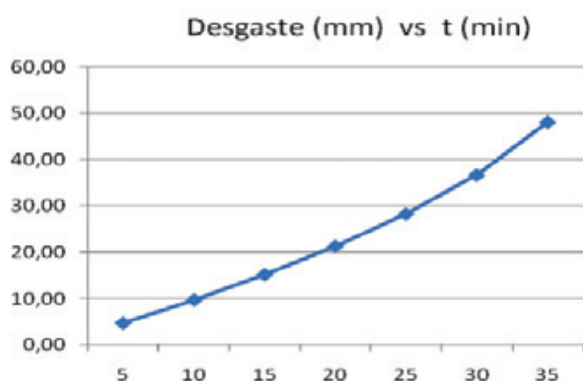


Figura 7: Desgaste acumulado en mm vs tiempo de operación

La Figura 7 se obtiene con los datos obtenidos en la Tabla anterior. Podríamos decir también que, de acuerdo a la misma Tabla de resultados obtenidos, el MBTF serían 35 minutos.

Con lo cual, ya es posible obtener la fiabilidad del disco de desgaste a partir de la expresión (8), porque estamos trabajando en la zona de vida útil de la pieza.

$$R(60) = \exp[-(60/35)] = 0,18 = 18\%$$

Entonces, la fiabilidad del disco para la primera hora o los primeros 60 minutos de funcionamiento será:

$$R(t) = \exp[-(t/MTBF)]$$

5. CONCLUSIONES

- A partir del modelo propuesto se pueden conocer valores de fiabilidad a partir del MTBF, que serán útiles para determinar la probabilidad de fallo, y para la previsión de materiales de cara mejorar la disponibilidad del componente que contribuirá al aumento de la productividad.
- Cada modelo de desgaste de elementos circulares giratorios sometidos a un desgaste radial es propio y único para esa marca y modelo, evidentemente tendrá su media y su varianza en función al tamaño de la muestra ensayada.
- El procedimiento empleado, puede servir de modelo para realizar predicciones de fiabilidad de otros componentes mecánicos sometidos a desgaste.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Angulo J, Mora R, Filippone G, Castellote C "Prediction of the reliability of a clutch in function of the wearing out of the linings of the clutch disk" International Review of Mechanical Engineering (I.R.E.M.E.), July 2008, Vol. 2, n. 4.
- [2] Angulo-Zevallos J. "Modelo estocástico para la determinación del tiempo de garantía óptimo en equipos mecánicos", Director: Sanz Bobi, MA./ Bautista Paz, E. Tesis Doctoral, ETSII – U.P.M., 1999.
- [3] Mora-Moreno R. "Optimización de la fiabilidad durante el tiempo de garantía en mecanismos de transmisión", Director: Angulo-Zevallos J. Tesis Doctoral, ETSII – UPM, 2004.
- [4] Lezana E, "Diagnóstico y Resolución de Fallos y Averías". Pamplona. T.M.I. D.L. 1994.
- [5] Raze J, Nelson J "Reliability Models for Mechanical Equipment": 1986 IEEE Proceeding Annual Reliability and Maintainability Symposium. pp. 322-326.
- [6] Valencia E. Fiabilidad: "Concepto y aplicación al diseño de máquinas volumétricas". Jun 1987. Automática e instrumentación pp. 193-202.
- [7] Lim SC, Ashby MF. "Wear-mechanism maps". Acta metallurgica, vol 35, No. 1 (1987), pag. 1-24, 1987.
- [8] Wang KS, Chen CS, Huang JJ "Dynamic reliability behavior for sliding wear of carburized steel". Reliability engineering & system safety, vol. 58 (1997), pag. 31-41.
- [9] Holmberg K "Reliability aspects of tribology". Tribology International, vol 34, (2001), pag. 801-808.