

Parámetros de topografía superficial para desgaste inicial

Víctor Martínez Fuentes¹

Resumen

El término “desgaste” se define como el daño o deterioro a la superficie. Uno de los métodos más comunes de ensayo de desgaste es el del tribómetro de perno en disco: sobre un disco girando se coloca un perno que lo presiona con una fuerza determinada; lo anterior resulta en el desgaste de ambas superficies. Se pueden usar varios parámetros para caracterizar el desgaste de los materiales del ensayo, mismos que dependen de la magnitud del proceso de desgaste ocurrido. Cuando únicamente interesa el desgaste inicial, no existe pérdida apreciable de volumen de los materiales y, en lugar de esto último, se prefiere registrar los cambios de topografía en las etapas iniciales de desgaste en el tribómetro. En este trabajo, se presenta la comparación de los diferentes parámetros de topografía superficial (los relacionados con la amplitud y los de espaciamento) y cómo están relacionados con el desgaste observado de superficies metálicas que fueron sujetas a ensayo en un tribómetro de perno en disco. Un análisis cuidadoso muestra que solamente un par de todos los parámetros es el más adecuado para describir los cambios en la topografía en el desgaste inicial.

¹Universidad Politécnica de Querétaro
victor.martinez@upq.mx

Abstract

Wear is defined as the damage or deterioration of a surface. One of the most common wear methods is the test on the pin-on-disk tribometer where a loaded pin is sliding against a rotating disk, yielding wear in both surfaces. Several parameters to characterize wear on materials can be used, their selection depend on the quantity of wear processing occurring on tests. At the beginning of the test occurs initial wear, in that stage there is no appreciable volume loss of materials, instead surface texture changes are registered to quantify wear. In this work, a comparison of different texture parameters related with both height and spatial characteristics is shown, and how these parameters are related with the observed wear of specimens under test in the pin-on-disk tribometer. Meticulous analysis demonstrates that just a few texture parameters are suitable for changes in surface texture from initial wear.

Palabras clave: topografía de superficie, tribómetro perno en disco, desgaste inicial

Introducción

El “desgaste” se suele definir como el daño a las superficies. Es común que se mida como el volumen de material perdido como consecuencia de la fricción generada en la interfase de las superficies; además, los cambios en la topografía de la superficie son un factor importante para determinar el grado de daño de un par tribológico en ensayos de desgaste.

Existen diferentes mecanismos de desgaste, algunos de ellos son predominantes bajo ciertas condiciones y, en otros casos, se alternan u ocurren de forma simultánea [1]. El desgaste inicial es aquel que se considera como una transición en el cual un sistema de baja fricción y desgaste ligero evoluciona a uno de alta fricción y desgaste severo [2]. En algunos casos, el inicial no alcanza estabilidad y se convierte en uno catastrófico. Las modificaciones que sufre la

topografía de la superficie en el desgaste inicial puede realzar o degradar su desempeño.

El aparato que permite realizar ensayos de desgaste se le llama tribómetro. Uno de los más comunes es el llamado “tribómetro de perno en disco” en donde se presiona con un perno la superficie de un disco que gira tal como se muestra en la Figura 1. Este frotamiento genera una huella de desgaste concéntrica tanto en la superficie del disco como en el perno durante intervalos que abarcan desde algunos minutos a varias horas y cuyo recorrido relativo del perno sobre el disco puede alcanzar hasta varios kilómetros. Los ensayos en este tribómetro son destructivos y el análisis de las superficies de los especímenes (disco y perno) se lleva a cabo *ex situ* conforme a la norma ASTM G99-05 [3]. Después de causar un daño apreciable en las superficies de los especímenes, son retirados del aparato y se utilizan métodos gravimétricos o volumétricos para determinar la cantidad de material removido por el desgaste en ambas superficies del disco y del perno. Usando un perfilómetro, se puede hacer la medición de la sección transversal (radial) de la huella de desgaste en el disco, con la finalidad de determinar el volumen de material removido.

El volumen determinado, ya sea por método gravimétrico o volumétrico, se usa para comparar varios materiales que se han sometido a las mismas condiciones para, entonces, establecer una relación relativa de desgaste entre ellos. De acuerdo a la norma ASTM G99-05, para calcular el desgaste en el disco, suponiendo que no ocurra uno significativo en el perno, se puede usar la siguiente ecuación [G99]:

$$\Delta V = 2\pi R \left(r^2 \sin^{-1} \left(\frac{d}{2r} \right) - \frac{d}{4} (4r^2 - d^2)^{1/2} \right) \quad (1)$$

Donde:

ΔV = pérdida de volumen del disco, [mm³]
 R = radio de la huella de desgaste, [mm]
 d = ancho de la huella de desgaste, [mm]
 r = radio de la punta del perno, [mm]

Como se observa en (1), la determinación del volumen de desgaste se hace a través de las

mediciones dimensionales de R , d y r . Este es el método volumétrico.

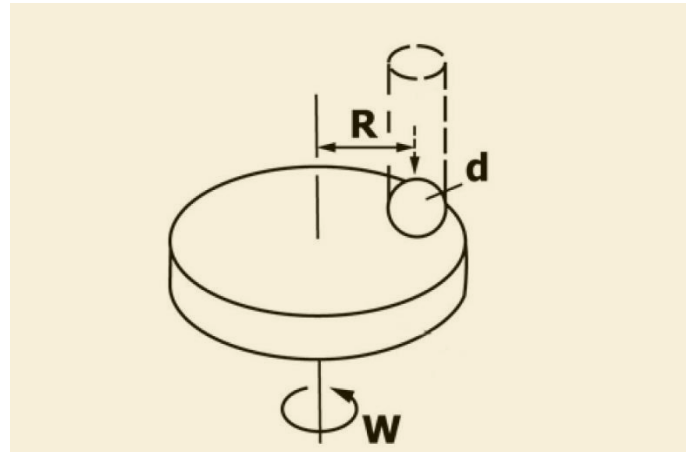


Figura 1. Esquema de un perno sobre disco. El disco se mantiene a una velocidad w constante [3]

En el caso en que el volumen de desgaste se determine a través de medir la pérdida de masa m del espécimen al final del ensayo, se aplica la siguiente ecuación:

$$\Delta V = \frac{m}{\rho} \quad (2)$$

Donde ρ es la densidad del material del disco. A esto se le conoce como el método gravimétrico.

Si se realiza un análisis de la incertidumbre en la medición del volumen de desgaste según la ecuación (1), se requiere determinar los coeficientes de sensibilidad de la variable de salida (desgaste ΔV), con respecto a las magnitudes de entrada (R , d y r), y sus incertidumbres individuales. Estas incertidumbres de entrada junto con los coeficientes de sensibilidad, calculados como la derivada parcial de la variable de salida con respecto a la de entrada, se usan para propagar las incertidumbres a través de la ecuación de la combinada, u_c . Para el caso en que las variables no están correlacionadas, es la siguiente [4]:

$$u_c(\Delta V) = \sqrt{\left(\frac{\partial(\Delta V)}{\partial R} u_R \right)^2 + \left(\frac{\partial(\Delta V)}{\partial d} u_d \right)^2 + \left(\frac{\partial(\Delta V)}{\partial r} u_r \right)^2} \quad (3)$$

u_R , u_d y u_r son las incertidumbres de esas magnitudes de entrada.

Para la que corresponde al método gravimétrico la incertidumbre combinada resulta:

$$u_c(\Delta V) = \sqrt{\left(\frac{\partial(\Delta V)}{\partial m} u_m\right)^2 + \left(\frac{\partial(\Delta V)}{\partial \rho} u_\rho\right)^2} \quad (4)$$

Si tenemos, como ejemplo, el radio de la huella circular de desgaste en el disco, R es de 40 mm y fue realizada por un perno con una punta de radio r de 2 mm para una huella de desgaste de ancho d mm. Las incertidumbres estimadas de estos parámetros son los siguientes: $u_R = 0.5$ mm, para la incertidumbre del radio R ; $u_r = 0.02$ mm, para la incertidumbre del radio r de la bola del perno y $u_d = 0.1$ mm, para la incertidumbre del ancho de la huella. La densidad ρ del material del disco es de 0.00787 g/mm^3 con su incertidumbre $u_\rho = 0.0001 \text{ g/mm}^3$. La incertidumbre en la determinación de la masa es $u_m = 0.001$ g. En la Figura 2 se muestra la relación entre el volumen de desgaste como una función del ancho de la huella de desgaste y su incertidumbre relativa estimada tanto por el método dimensional como por el método gravimétrico de pérdida de masa para este caso específico.

En la Figura 2 también se observa cómo la incertidumbre relativa se reduce conforme el volumen aumenta y el ancho de la huella de desgaste se incrementa (conforme aumenta el tiempo del ensayo). Con lo anterior, se muestra y justifica que estas pruebas son de larga duración debido a que con ello producen una menor incertidumbre en la determinación del desgaste. Por lo tanto, se puede concluir que estos dos métodos, volumétrico o por gravimetría, no son convenientes para caracterizar el desgaste incipiente en pruebas cortas de desgaste debido a su alta incertidumbre relativa.

Sin embargo, si se quiere analizar el desgaste inicial, es necesario recurrir a otros métodos donde el daño a la superficie es principalmente debido al cambio de topografía en la superficie desgastada y no tanto a la pérdida o remoción del material desgastado. En esta investigación se analiza los parámetros de topografía y compararlos con respecto a su función de cambio en las condiciones de desgaste. Para ello, se

ocuparon especímenes de aluminio, bronce y acero cuyo desgaste inicial fue incipiente, sin llegar a ser severo. El desgaste se realizó en un tribómetro de perno en disco cuyas características se muestran más abajo. Las topografías de las huellas de desgaste fueron obtenidas con un perfilómetro y se analizaron sus parámetros estadísticos. Se muestran los resultados de estos parámetros estadísticos.

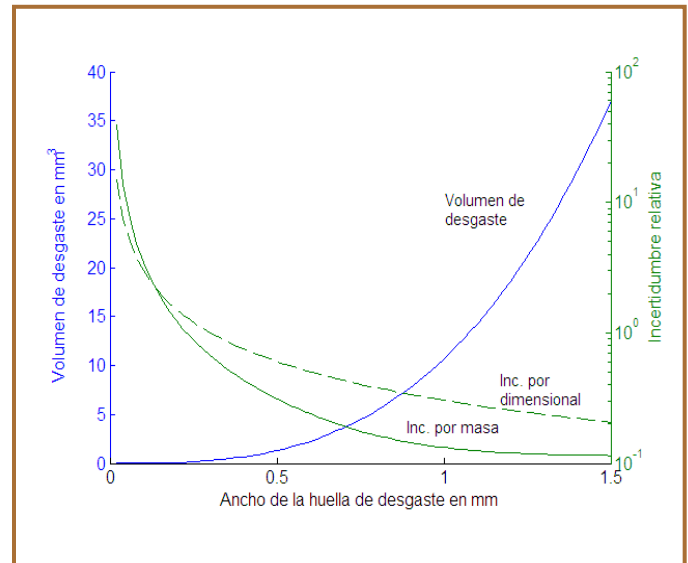


Figura 2. Volumen de desgaste e incertidumbre relativa ($k=1$) como función del ancho de la huella de desgaste en un ensayo de desgaste en tribómetro de perno en disco.

Método

Cuando se ponen en contacto dos superficies metálicas y se deslizan entre sí, las puntas de las asperezas de cada una de las superficies se deforman plásticamente [5]. Esta deformación resulta en una modificación permanente de la topografía inicial. Es entonces que, al comienzo del ensayo de desgaste, en el primer contacto del perno sobre el disco, la altura y pendiente de las asperezas de las superficies de ambos cambian. Durante un ensayo de desgaste en el tribómetro de perno en disco, ocurren los diferentes mecanismos, principalmente el adhesivo; pero también puede ocurrir desgaste por fatiga o por corrosión.

El desgaste inicial es de interés en ingeniería; de hecho, existe una condición de asentamiento

(*running-in*) que se identifica usualmente con muy poco desgaste y/o baja fricción. Además, un sistema o máquina asentada es aquella que tiene una alta capacidad de carga. Frecuentemente, una máquina se expone a una secuencia de periodos de asentamiento con incrementos de severidad para incrementar las etapas de capacidad; al mismo tiempo, reducir el riesgo de una falla catastrófica debido al rayado de la superficie (*scuffing*) derivado de la sobrecarga de la pieza de trabajo [2].

Examinando la topografía, forma y propiedades del material, debería ser posible diseñar, desarrollar o aún modificar el proceso de contacto entre superficies que ocurre, por ejemplo, que en la manufactura, el acabado superficial se asemeje lo más posible a la condición de asentado. Lo anterior es lo que se intenta determinar con los ensayos de desgaste en el tribómetro. La caracterización de este proceso puede hacerse sólo a través del análisis de los cambios de topografía ocurridos en el espécimen bajo prueba después de la de ensayo realizada con apoyo de un perfilómetro.

Medición del cambio de topografía en desgaste inicial

Casi todas las superficies conocidas son rugosas. Esto significa que muchas de las partes de una superficie no son planas, sino que forman un pico o un valle. La amplitud típica entre ambos para superficies de ingeniería es alrededor de un micrómetro. La forma del perfil de una superficie es mayormente aleatoria a menos que se le introduzcan algunas características regulares. Se dice que, durante el desgaste moderado, los picos de las asperezas de la superficie se truncan, lo que resulta en un perfil que consta de mesetas y valles. De acuerdo con esto, las superficies se distribuyen de acuerdo a una distribución bimodal [6].

Las superficies reales son difíciles de definir. Para describir la superficie, se necesitan al menos dos parámetros: uno que describa la variación en la altura; el otro que describa cómo varía la altura en una dirección del plano de la superficie.

Parámetros de amplitud R_a y R_q .

La rugosidad o topografía superficial se refiere de forma más común a la variación en la altura de la superficie con respecto a un plano de referencia. Se considera un perfil $z(x)$ en donde las alturas de éste se miden a partir de una línea de referencia. Se define una línea central o línea promedio a una en la que el área entre el perfil y la línea media arriba de ésta es igual al área debajo de ella.

R_a es la media aritmética de los valores absolutos de la desviación vertical desde la línea media en todo el perfil. La desviación estándar σ es la raíz cuadrada de la media aritmética del cuadrado de la desviación vertical desde la línea media.

En forma matemática:

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |z - m| dx \quad (5)$$

y

$$m = \frac{1}{L} \int_0^L z dx \quad (6)$$

donde L es la longitud de muestreo del perfil

R_q es la raíz cuadrada de la media aritmética del cuadrado de la desviación vertical desde la línea de referencia, o

$$R_q^2 = RMS^2 = \frac{1}{L} \int_0^L (z^2) dx \quad (7)$$

El valor R_a está estandarizado en muchos países; R_q se usa comúnmente en análisis estadísticos. Existen otros parámetros de altura y todos ellos están descritos por la norma ISO 4287:1997

Parámetros espaciales

Las características espaciales (amplitud vertical y desplazamiento horizontal) de las superficies reales se describen por un número de funciones estadísticas. Aunque dos superficies tengan los mismos parámetros de altura, su arreglo espacial, su comportamiento en la fricción y el desgaste pueden ser muy diferentes. Las funciones de autocovarianza y de autocorrelación se utilizan para discriminar las diferentes características espaciales de la superficie;

según Stachowiak y Batchelor [6], no son muy sensibles para estudiar cambios en la topografía superficial debidos al desgaste. Ellos sugieren que el problema se puede solventar usando la función “estructura” que permite una descripción más exacta de las características de la superficie. Las ecuaciones de las funciones mencionadas en este párrafo son [7, 8] las siguientes:

Función de autocovariancia (ACVF o $R(\tau)$)

$$R(\tau) = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} \int_0^L z(x)z(x + \tau)dx \quad (8)$$

La función de autocorrelación, ACF ó $\rho(\tau)$

$$\rho(\tau) = \frac{R(\tau)}{R_q^2} \quad (9)$$

Función estructura, SF ó $S(\tau)$

$$S(\tau) = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} \int_0^L [z(x) - z(x + \tau)]^2 dx \quad (10)$$

Donde τ es la distancia espacial.

Ensayos y mediciones

El tribómetro que se ocupó para provocar el desgaste en los especímenes está operado por un motor de c.d. de ¼ hp acoplado con una banda al eje rotatorio del soporte, mandril de tres mordazas, para el disco. El espécimen se mantiene sujeto entre las mordazas y se nivela horizontalmente. La velocidad del disco se puede seleccionar y controlar desde 0 a 600 rpm a través de un controlador electrónico con encóder óptico. El perno consiste en una barra que sujeta, con un mecanismo roscado, una esfera de 2.4 mm de diámetro de acero de rodamiento; esta esfera se intercambia en cada ensayo de desgaste.

Los ensayos se realizaron bajo las condiciones de laboratorio a $24^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ y $58\% \text{HR} \pm 3\% \text{HR}$ de temperatura y humedad respectivamente. Se utilizaron tres materiales diferentes: aluminio, latón y acero que fueron ensayados a la misma carga de 2 N y velocidad tangencial de 0.88 m/s. Cada espécimen (disco) se usó para varias huellas de desgaste a diferentes radios, pero ajustando siempre

la velocidad de giro a la velocidad tangencial mencionada. Cabe señalar que se hicieron ensayos con mayor carga, pero ellos llevaron a desgaste severo en poco tiempo. La carga de 2 N resultó la adecuada, ya que, a valores de 4 N y mayores, el desgaste rápidamente se convirtió en severo para el aluminio y el acero. Cada espécimen se midió en tres diferentes momentos de desgaste; esto es, en recorridos relativos de perno en disco. Para cada material -aluminio, bronce y acero-, se realizaron mediciones de su topografía antes del ensayo del desgaste y los valores de los parámetros de esta topografía se tomaron como referencia.

En la Tabla 1, se muestra la rugosidad antes del desgaste y su longitud de recorrido D1, D2 y D3 cuyo valor de recorrido relativo esta expresado en metros. En el caso del aluminio, la tercera distancia, la D3 de mayor recorrido, resultó en un desgaste severo en cuyo caso la topografía tuvo cambios drásticos e irregulares con arranque y desplazamiento de material sobre la misma huella.

Tabla 1. Rugosidad inicial y las tres diferentes condiciones de desgaste (longitud de recorrido)

Materiales	Rugosidad inicial R_q (μm)	D1 [m]	D2 [m]	D3 [m]
Bronce	0.12 ± 0.01	80	150	170
Acero AISI 1018	0.13 ± 0.01	41	88	424
Aluminio	0.26 ± 0.02	6	66	322

Una vez ensayados los tres materiales con los diferentes recorridos de desgaste, se midió la topografía en cada huella generada. Las mediciones de la topografía se realizaron con un perfilómetro marca Mitutoyo, modelo SJ-400. Este último se ajustó para realizar el recorrido de aproximadamente 1.25 mm, de forma tal que cubriera el ancho de la huella de desgaste. Se quitaron los filtros de rugosidad u ondulación para que sólo se midiera el perfil tal como se encuentra.

Para cada perfil se obtuvieron 8400 datos de las alturas separados en pasos de $0.15 \mu\text{m}$ cada uno.

Estos datos se analizan con MATLAB para obtener los parámetros R_a , R_q , $ACVF$, ACF y SF . Además, con varios algoritmos se obtuvieron otros parámetros estadísticos como la pendiente de la rugosidad, el radio promedio de los picos de rugosidad, el histograma de la distribución y la distribución acumulada (similar a la llamada curva BAC usada en lubricación).

Resultados

Como se menciona en la sección anterior, la obtención del perfil de la topografía superficial se realizó para la condición inicial y para los diferentes recorridos de desgaste. Se ilustra lo anterior en la

Figura 3, donde se muestran dos imágenes de huellas de desgaste en bronce tomadas en un microscopio óptico con una amplificación de 50X. Por otro lado, la Figura 4 muestra gráficas del perfil de alturas correspondiente. Con propósitos de visualización, también se graficaron las distribuciones de alturas de rugosidad en histogramas para las dos imágenes de la Figura 3 (ver Figura 5).

En los tres casos de recorridos de desgaste y para los tres materiales de los especímenes, se obtuvieron los parámetros estadísticos que se observan en las ecuaciones (5-10) a partir de los valores de los perfiles de las gráficas mostradas en la Figura 4.

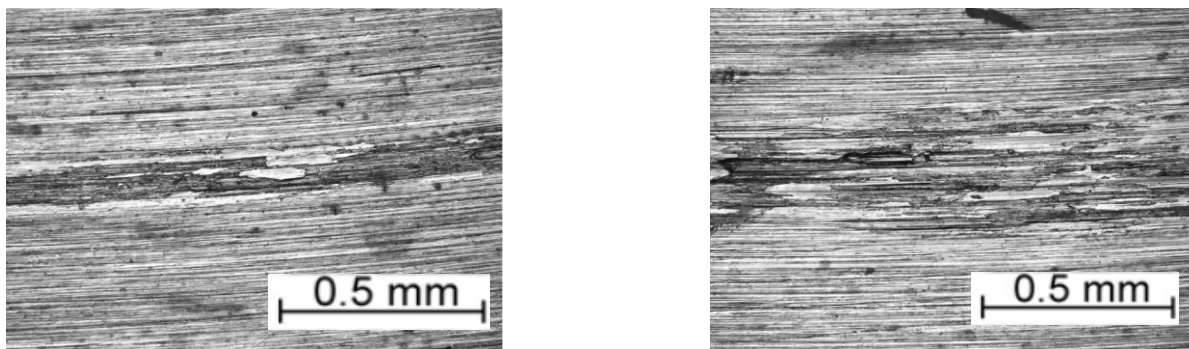


Figura 3. Imágenes de huellas de desgaste en bronce: (a) corresponde a un recorrido D1 cuya longitud fue de 80 m; mientras que en (b), la D3, a un recorrido de 170 m respectivamente.

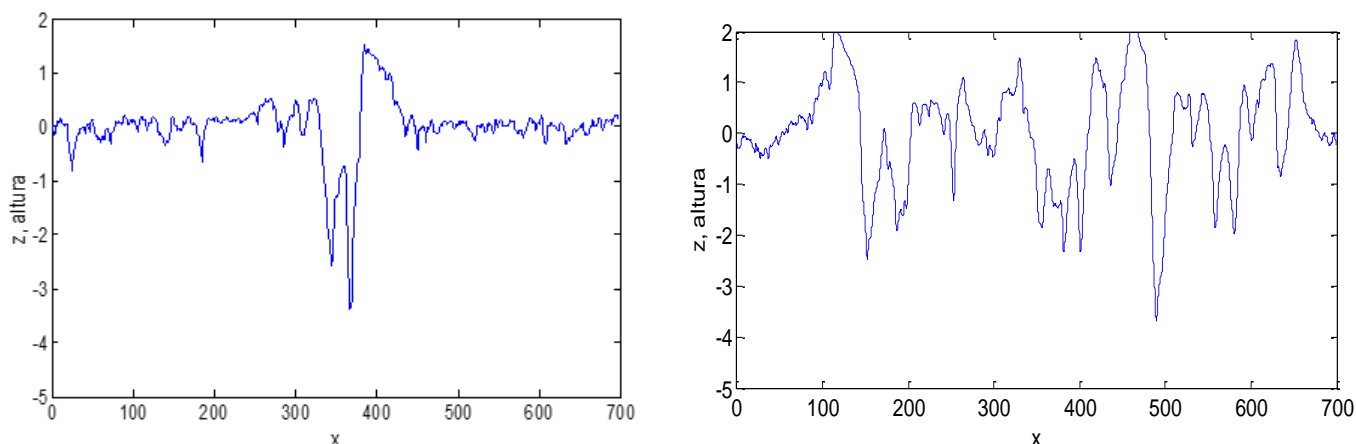


Figura 4. Gráfica de perfil de alturas de las huellas de desgaste mostradas en las figuras 3a y 3b. La escala vertical y horizontal son las mismas (en μm) en ambas gráficas con el propósito de comparación: (a) corresponde a un recorrido D1 cuya longitud fue de 80 m; mientras que en (b), la D3, a un recorrido de 170 m respectivamente.

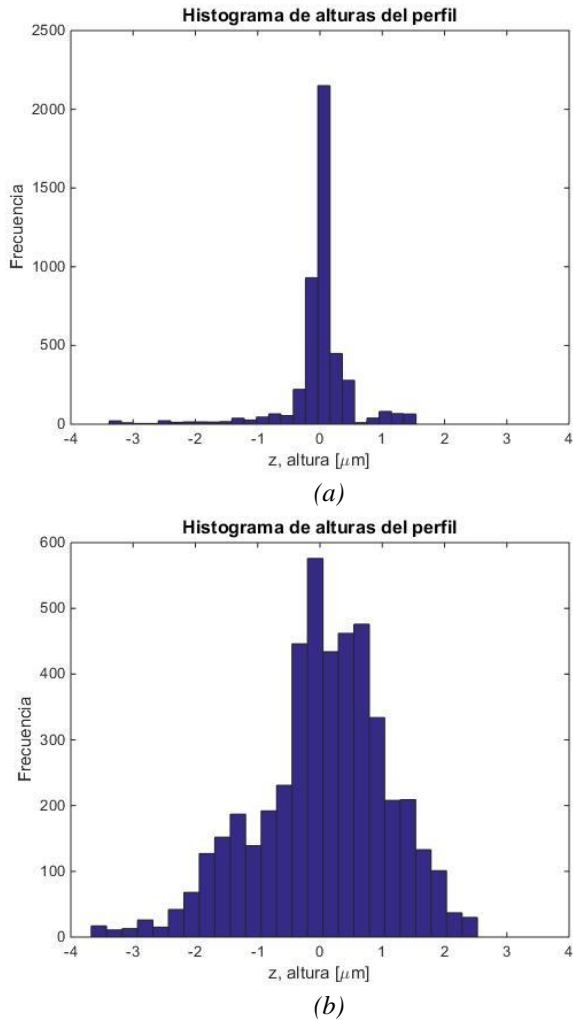


Figura 5. Gráficas de la distribución de alturas de rugosidad de las huellas de desgaste mostradas en figuras 3a y 3b: (a) con desgaste cuya longitud de recorrido fue de 80 m y (b) a 170 m de recorrido respectivamente.

Para cada condición de desgaste D1, D2 y D3 en cada material, se compararon los valores de los parámetros de topografía con respecto al valor inicial sin desgaste. En las figuras 6, 7 y 8, se muestran las gráficas de los valores relativos Ra , Rq , $ACVF$, ACF y SF con respecto a la condición “sin desgaste”, de tal forma que, en ésta, su valor es la unidad. Para los parámetros $ACVF$, ACF y SF se calcularon en ambos casos con un valor de $\tau = 1.5 \mu m$ (10 pasos de espaciamiento horizontal) seleccionado experimentalmente como el óptimo para indicar cambios significativo en los valores de los parámetros de espaciamiento.

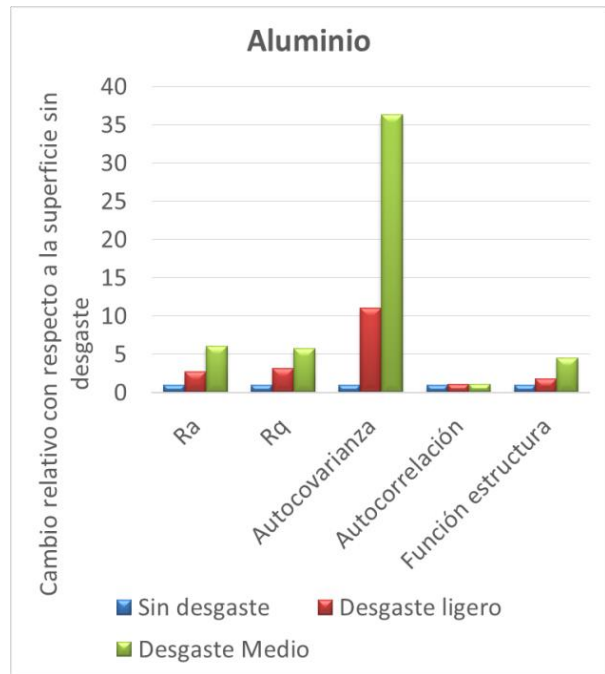


Figura 6. Cambios relativos de los parámetros de topografía de superficies desgastadas cuando se compara con los de la inicial para aluminio.

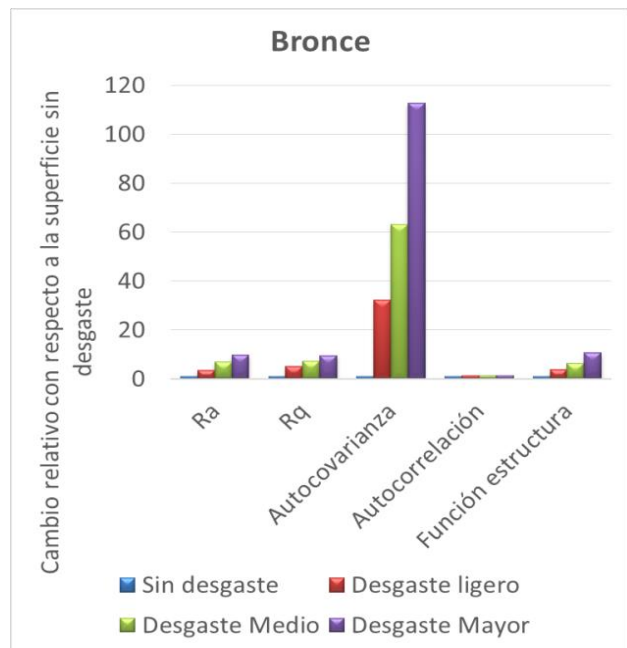


Figura 7. Cambios relativos de los parámetros de topografía en de superficies desgastadas cuando se compara con los de la inicial para bronce.

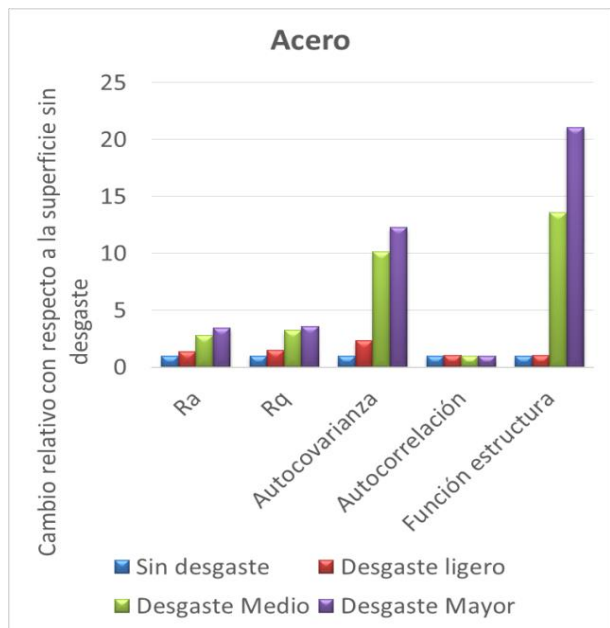


Figura 8. Cambios relativos de los parámetros de topografía de superficies desgastadas cuando se compara con los de la inicial para acero.

Discusión y conclusiones

En las pruebas de desgaste inicial de materiales con el tribómetro de perno en disco, para evaluar el desgaste ligero de una superficie (donde no existe la suficiente pérdida de material para hacerlo por métodos volumétricos o gravimétricos), se puede usar los parámetros de la topografía de la superficie desgastada.

En las gráficas de las figuras (6–8), se muestran en todos los casos que las rugosidades Ra y Rq presentan cambios significativos en el desgaste de los tres materiales evaluados. Se observa que a pesar de que en la literatura se recomienda usar, para cambios de desgaste, los parámetros de espaciamiento [6] o funciones de altura [9]. En nuestros experimentos, se observa que el parámetro función de autocovarianza, ACVF, muestra mayor resolución para detectar cambios de topografía debidos a desgaste inicial a excepción de la función estructura SF para el acero. Llama la atención que la función autocorrelación ACF no muestra sensibilidad a los cambios en el perfil de rugosidad en ningún caso analizado.

Los resultados nos muestran que la función de autocovarianza ACVF se puede considerar como uno de los parámetros de textura más adecuados para caracterizar los cambios que sufre la superficie en el desgaste inicial durante ensayos en el tribómetro de perno en disco. La ACVF tiene mayor sensibilidad que los parámetros Ra , Rq y SF también analizados en este estudio.

También, se observa que, en estas pruebas de desgaste inicial usando el tribómetro de perno en disco, no se llega a la condición de asentamiento, en donde los picos de rugosidad se eliminan y queda una superficie con mayor capacidad de carga. En cambio, este desgaste inicial incrementa la amplitud de la rugosidad.

Referencias bibliográficas

- [1] Rabinowicz, E. "Friction and Wear of Materials." New York: John Wiley and Sons, 1995.
- [2] Hutchings, I. M. "Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials." Metallurgy and Materials Science London: Edward Arnold, 1992.
- [3] ASTM. G99-05 (2016) "Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus." ASTM Standards, 2016.
- [4] "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement." BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAP, IUPAC, OIML, 1995.
- [5] Arumugaprabu, V. et al. "A Brief Review On Importance Of Surface Texturing In Materials To Improve The Tribological Performance" Rev. Adv. Mater. Sci. 53. 2018
- [6] Stachowiak, G.W. y Batchelor, A.W. "Engineering Tribology." USA: Butterworth-Heinemann, 2000.
- [7] Whitehouse, David J. "Handbook of Surface and Nanometrology." London: IOP publishing, 2003.
- [8] Bhushan, Bharat. "Surface Roughness Analysis and Measurement Techniques." Modern Tribology Ed. Bhushan, Bharat CRC press LLC, 2001.
- [9] Labašová, E. "Measurement of Changes of the Surface Roughness in Sliding Area". American International Journal of Contemporary Research. Vol. 3 No. 4; April 2013