

La rugosidad de las superficies: Topometría

Moisés Hinojosa Rivera, Martín Edgar Reyes Melo*

Abstract

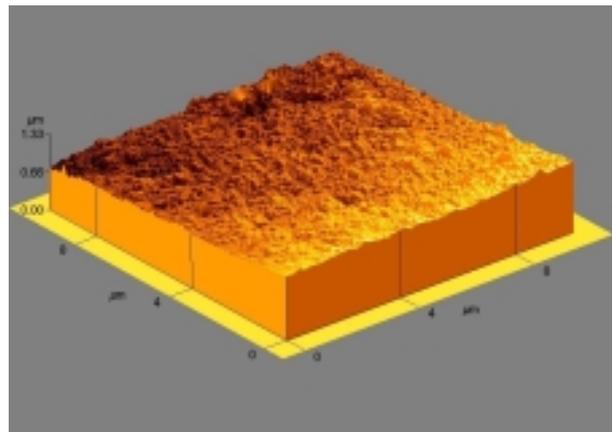
The importance of accurate roughness measurements is discussed in this work, the most common techniques to record topographic profiles are described and the most popular parameters used to quantify roughness are presented. A brief discussion on the self-affine character of height profiles is also presented. The fact that both the average roughness and the rms roughness depended on the sample length and hence cannot be considered as surface properties is emphasized. The use of the roughness exponent in modern statistical topometric methods is also included in this discussion.

INTRODUCCIÓN

Las superficies de los cuerpos son objetos muy complejos, en ellas la composición química es en general diferente de la composición dentro de los objetos, los materiólogos saben que el ordenamiento atómico también es muy distinto en las superficies y es mucho más complicado y difícil de describir, aún las superficies consideradas como “muy lisas” muestran, cuando son analizadas a escala suficientemente fina, una compleja diversidad de particularidades geométricas, tal vez estas razones llevaron al ilustre Wolfgang Pauli (1900-1958) a afirmar que “las superficies son obra del demonio”.

Desde el punto de vista de la ciencia e ingeniería de materiales, la topografía se ocupa de la descripción del conjunto de particularidades geométricas naturales o artificiales que caracterizan a una superficie. En cierta manera es un pleonismo hablar de “topografía de superficies”. Uno de los conceptos que se usan en topografía para describir la irregularidad de las superficies es el de rugosidad.

La cuantificación de la rugosidad es uno de los problemas que aborda la topometría. El objetivo del



presente artículo es discutir de manera sencilla algunos métodos y técnicas que se usan para describir cuantitativamente la rugosidad de las superficies encontradas en componentes de ingeniería.

ALGUNAS CONSIDERACIONES SOBRE LA IMPORTANCIA DE CUANTIFICAR LA RUGOSIDAD

Tanto en aplicaciones industriales como en la vida cotidiana, el grado de rugosidad de las superficies es importante, en ocasiones es deseable tener rugosidad “alta” y en otras ocasiones esta condición es indeseable. En algunos casos se busca que la superficie del producto terminado presente un mínimo de rugosidad, ya que esto le da brillo, mejor apariencia y disminuye la fricción de la superficie al estar en contacto con otra, reduciendo el fenómeno de desgaste y la corrosión o erosión de dichos materiales.

* FIME-UANL, A. P. 076 Suc. F, Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, N. L., Méx. 66450
hinojosa@gama.fime.uanl.mx

Por otra parte, la fricción entre dos superficies es lo que permite sujetar un objeto sin que este resbale. Es la rugosidad de los neumáticos de los automóviles lo que favorece la fricción entre ellos y el suelo, permitiendo de esta manera el agarre y el avance controlado y seguro. En ocasiones se busca maximizar el área superficial, lo que se consigue incrementando la rugosidad, como en el caso de los catalizadores, cuya eficiencia es mejor entre mayor sea la superficie de contacto con los reactivos. Es la rugosidad de los “acetatos”, principalmente, lo que determina si pueden usarse en una impresora láser o en impresoras de inyección de tinta.

La rugosidad también es un factor biológico, ya que a escala molecular afecta el modo en que las bacterias se adhieren a las superficies. Los materiales dentales deben presentar una superficie con el mínimo de rugosidad posible, para evitar la acumulación de placa bacteriana y para conseguir un mejor efecto estético. A pesar de su importancia, en la mayoría de los casos las mediciones de rugosidad se realizan de manera subjetiva, lo cual conduce a interpretaciones o conclusiones vagas e imprecisas.

SUPERFICIES ESTOCÁSTICAS Y SUPERFICIES DETERMINISTAS

Topográficamente, aquellas superficies que no tienen una dirección o patrón geométrico preferente debido al proceso de su generación se conocen como aleatorias o estocásticas, las superficies que resultan de romper un objeto generalmente son de este tipo. Las superficies con un patrón geométrico distinguible se conocen como deterministas, una superficie maquinada en un torno es de este tipo.

TÉCNICAS Y MÉTODOS PARA MEDIR LA RUGOSIDAD.

El método más usado en la industria para cuantificar la rugosidad se basa en el registro de perfiles de alturas mediante un rugosímetro o perfilómetro. El tratamiento estadístico de los datos permite determinar parámetros como la rugosidad rms (R_{rms}) y la rugosidad promedio (R_a).

El Perfilómetro

El rugosímetro o perfilómetro es por mucho el equipo más utilizado en la industria en general para medir la rugosidad de componentes comunes de ingeniería. El principio de operación de este equipo es simple: una fina punta en contacto con la superficie a analizar realiza un barrido controlado en línea recta y las variaciones de alturas se convierten en señales eléctricas y se registran o grafican, en la figura 1 se ilustra este principio.

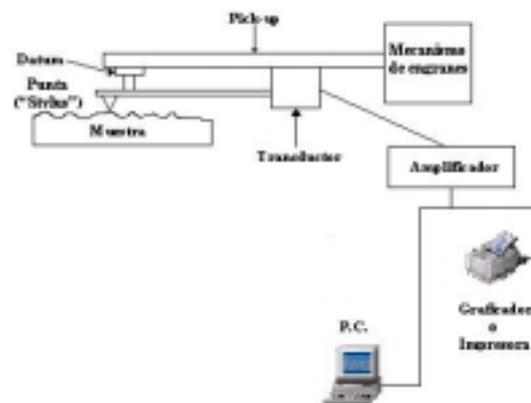


Fig. 1. Principio de operación y componentes de un rugosímetro perfilométrico.

Es posible construir imágenes de la topografía en 3D mediante barridos sucesivos, algunos autores llaman a esta técnica “Microscopía Mecánica de Barrido”.

Un parámetro muy importante de estos equipos es la forma y el radio de la punta, ya que ésta influye de forma importante en la resolución lateral de las mediciones. Típicamente se utilizan puntas con radios de algunos micrómetros, $2\ \mu\text{m}$ es un valor común. Aunque la resolución vertical es generalmente menor que el radio de las puntas, no pueden detectarse con alta precisión valores de rugosidad menores al radio de la punta. En general, una punta burda o desgastada resulta en valores de rugosidad más bajos que los obtenidos usando puntas finas. Típicamente un perfilómetro permite longitudes de muestreo de hasta algunos centímetros con resolución micrométrica.

Otros equipos

En este apartado mencionaremos brevemente solo algunos de los equipos diferentes al perfilómetro que tienen un uso relativamente frecuente en la cuantificación de la rugosidad. Debemos mencionar también que existen muchos equipos, accesorios y métodos que permiten una evaluación cualitativa de la rugosidad. En general los equipos para medir la rugosidad pueden clasificarse como de contacto y de no-contacto. Además del perfilómetro, otro equipo de contacto digno de mencionar es el microscopio de fuerza atómica (MFA), que en aplicación a observaciones topográficas puede considerarse como un perfilómetro de resolución sub-nanométrica que opera de forma similar a la mostrada en la figura 1. Típicamente el MFA permite longitudes de muestreo máximas de $100\ \mu\text{m}$ con resolución nanométrica. En la figura 2 se muestra una imagen

de MFA correspondiente a una superficie de vidrio, más adelante en el texto haremos referencia nuevamente a esta figura.

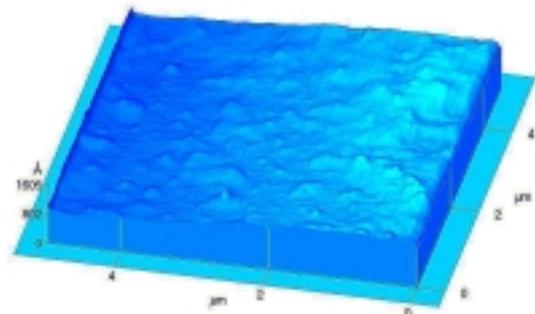


Fig. 2. Imagen de microscopía de fuerza atómica (MFA) de la zona especular en una superficie de vidrio fracturado.

Los equipos de no-contacto son en general ópticos aunque el microscopio de fuerza atómica puede también operarse en modo sin contacto. Los equipos ópticos se basan en cambios en el enfoque de luz monocromática que corresponden a diferencias de alturas en la superficie. Otros equipos ópticos aprovechan el fenómeno de interferencia (interferómetros). Un equipo óptico común en metrología de taller que puede utilizarse para determinaciones cuantitativas de rugosidad es el proyector llamado Comparador Óptico.

LOS PARÁMETROS DE RUGOSIDAD

En general los parámetros utilizados para cuantificar la rugosidad pueden interpretarse como parámetros propios de la distribución estadística de alturas del perfil o superficie bajo análisis.

Antes de discutir los parámetros de rugosidad es conveniente distinguir entre la rugosidad propiamente dicha y otros componentes de la

textura o morfología como la ondulación (waviness), la curvatura y la inclinación o tendencia (trend). En la figura 3 puede observarse que una superficie puede poseer curvatura y/o ondulación periódica o aperiódica, estos componentes deben eliminarse o extraerse antes de cuantificar la rugosidad.

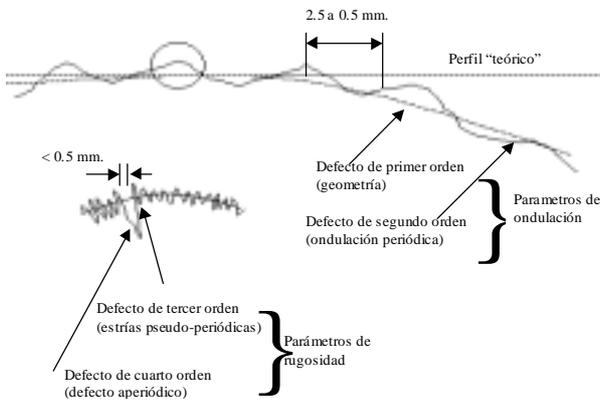


Fig. 3. Los cuatro primeros órdenes de defectos topográficos en una superficie con curvatura y ondulación.

La figura 3 ilustra los cuatro órdenes de defectos topográficos que distinguen algunos autores. La desviación del perfil respecto a la forma esperada (en el maquinado por ejemplo) se considera el defecto de primer orden. La ondulación periódica a nivel mesoscópico y macroscópico se considera defecto de segundo orden mientras que las estrías pseudoperiódicas pertenecen al tercer orden. En cuarto orden se tiene los defectos aperiódicos.

Los parámetros de rugosidad más usados en ingeniería son la rugosidad promedio, (R_a) y la rugosidad rms (R_{rms}). R_a es el promedio aritmético de los valores absolutos de las alturas $y(x)$ medidas a partir de la línea central, figura 4. Matemáticamente R_a se define como:

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx$$

Dónde L es la longitud de muestreo.

A su vez R_{rms} se define como:

$$R_{rms} = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L [y(x)]^2 dx}$$

R_{rms} representa el promedio de las desviaciones cuadráticas respecto a la altura media, es la desviación estándar de la distribución estadística de alturas, que a su vez es la raíz cuadrada de la varianza o segundo momento respecto a la media.

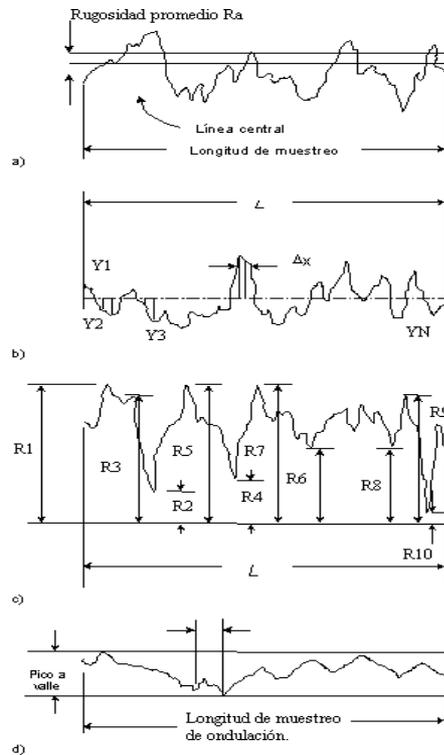


Fig. 4. Designación de algunos parámetros de rugosidad.

Los diferentes procesos de manufactura dan lugar a valores de rugosidad inherentes típicos. Como ejemplos, el corte con soplete produce valores R_a de hasta 50 micrómetros, la extrusión proporciona valores típicamente menores a 10 μm , el electropulido logra superficies muy lisas con R_a del orden de 0.1 μm .

Producir superficies poco rugosas tiene un costo, en la Tabla I se muestra el costo relativo de obtención de diferentes grados de R_a tal como se indican (en inglés) en el ASM Metals Handbook.

Otra medida de la rugosidad que se emplea mucho en trabajos de investigación de topometría es el rango, R_y o diferencia máxima de alturas en la longitud de muestreo, también es un momento estadístico.

TABLA I

Clase	Rugosidad, R_a (μm)	Costo relativo de obtención
Super finish	0.10	40
Polish	0.20	35
Ground	0.40	25
Smooth	0.80	18
Fine	1.60	13
Semifine	3.2	9
Medium	6.3	6
Semirough	12.5	4
Rough	25	2
Cleanup	50	1

El usuario de un rugosímetro puede percatarse de que desafortunadamente la rugosidad reportada por los parámetros discutidos depende fuertemente del tamaño de muestreo, en general se encuentra que a mayores longitudes de muestreo se detecta mayor rugosidad. R_a y R_{rms} no pueden considerarse como propiedades de una superficie.

En la figura 3 se muestran los parámetros de rugosidad aquí discutidos y se incluyen además los parámetros R_z o “altura de diez puntos”, y la “altura de ondulación”, W . R_z es la distancia promedio entre los cinco picos más altos y los cinco valles más profundos en la longitud de muestreo. W tiene una definición aún más rebuscada. Existen otras medidas de la rugosidad que se pueden consultar en las lecturas recomendadas.

ESCALAMIENTO Y AUTOAFINIDAD

La gran irregularidad morfológica de los perfiles topométricos se presta para su análisis mediante la geometría fractal. Es evidente que un perfil obtenido al analizar la superficie de un componente de ingeniería con un perfilómetro puede compararse al perfil de una montaña, si no se especifica la escala respectiva ambos podrían tomarse como equivalentes, esta propiedad es llamada autosimilitud o más propiamente autoafinidad. La aplicación de conceptos de la geometría de fractales al análisis de perfiles rugosos permite demostrar que los diferentes momentos estadísticos de la distribución de alturas de ciertos perfiles dependen del tamaño de muestreo L y siguen un comportamiento proporcional a L^H (ley de Potencia). El exponente H es conocido como el exponente de Hurst o exponente de rugosidad, está relacionado a la dimensión fractal y caracteriza o cuantifica la irregularidad del perfil. Los perfiles que cumplen con tal relación se dice que son autoafines. La figura 5 muestra perfiles generados por computadora con diferentes valores de H , nótese que a medida que H aumenta los perfiles lucen más “lisos”, una línea completamente lisa o recta posee un valor H de 1. A diferencia de los parámetros R_a y R_{rms} , idealmente H es independiente del tamaño de muestreo.

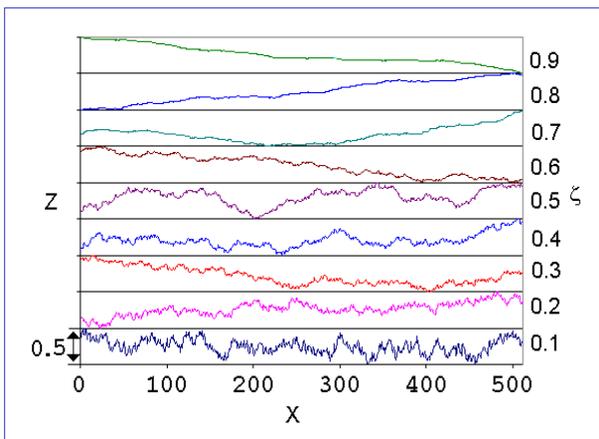


Fig. 5. Perfiles con diferente exponente de rugosidad generados usando un algoritmo matemático (Cortesía V. González).

Al principio de este artículo se mencionó que aún los objetos más lisos muestran gran irregularidad si son analizados a escala suficientemente pequeña. Un ejemplo dramático de esto lo proporcionan las familiares superficies de un vidrio roto. Si se observa la zona cercana al origen de la fractura con una lupa, es fácil distinguir tres zonas, dos zonas de rugosidad marcada y una zona muy “lisa” y brillante, esta última zona es llamada “espejo”. En la figura 6 se muestran estas zonas tal y como se observan en un microscopio electrónico.

Si se emplea un perfilómetro para analizar la zona espejo se concluye que la superficie es efectivamente lisa o con rugosidad escasa. Sin embargo, el análisis de esta zona mediante un microscopio de fuerza atómica muestra que la zona espejo tiene una topografía como la mostrada en la figura 2, el aspecto de dicha zona ahora es muy “rugoso”.

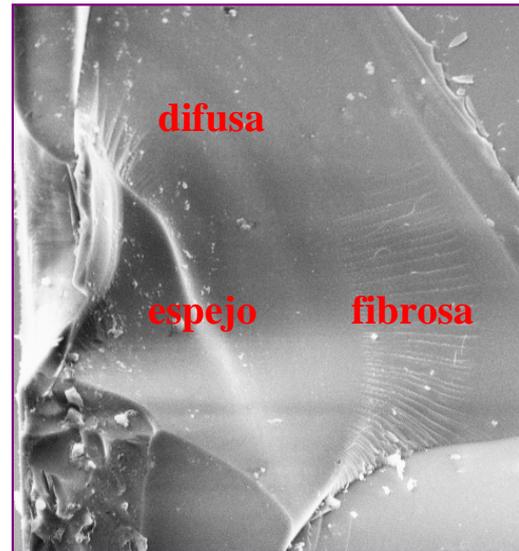


Fig 6. Superficie de un vidrio fracturado mostrando las tres zonas características.

¿Por qué refleja tan bien la luz una superficie tan “rugosa”? Simplemente porque la magnitud máxima de las variaciones topográficas es del orden de 100 nanómetros, magnitud inferior a la longitud de onda de la luz. La figura 7, construida empleando el llamado método de ventanas de ancho variable, muestra el comportamiento típico de los momentos estadísticos $w(r)$ al variar la longitud de muestreo, se observa el comportamiento de ley de potencia con $H = 0.8$, dicho comportamiento autoafín se pierde para un valor de longitud de muestreo del orden de 100 nanómetros (100×10^{-9} m), dicho valor límite es conocido como la longitud de correlación. Un perfilómetro indicará rugosidad nula porque su resolución es insuficiente para revelar detalles menores que la longitud de correlación.

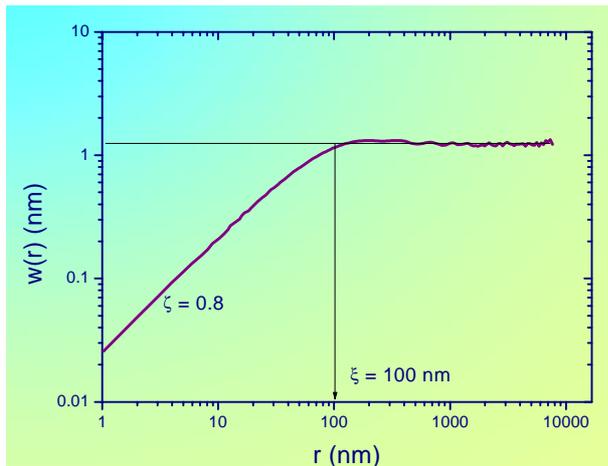


Fig. 7. Variación de los momentos estadísticos con el tamaño de muestreo en la zona espejo de una fractura en vidrio.

CONCLUSIÓN

En general todas las superficies manifiestan una gran irregularidad morfológica. Industrialmente el instrumento más empleado para medir la rugosidad es el perfilómetro. El microscopio de fuerza atómica permite analizar la topografía a escalas mucho más finas que un perfilómetro. Los parámetros más empleados para medir la rugosidad son R_a y R_{rms} , sin embargo estas cantidades dependen del tamaño de muestreo y no pueden ser consideradas como propiedades de una superficie. Los métodos de vanguardia a nivel investigación emplean longitudes de muestreo variables y cuantifican la rugosidad mediante el exponente de Hurst y la longitud de correlación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la ayuda de V. González, F. Sánchez, E. Sánchez, D. Sánchez.

LECTURAS RECOMENDADAS

1. F.M. Lira, J. L. Morán López, "El Encanto de las Superficies", Serie la Ciencia desde México, No. 111, Fondo de Cultura Económica, 1992.
2. J.A. Broadston, "Designación, Producción y Control de la Textura Superficial", en Manual del Ingeniero Mecánico Marks, E. A. Avallone y T. Baumeister, 3ª ed., McGraw-Hill, p. 13.86-13.92, 1992.
3. M. Field, J.F. Khales y W.P. Koster, "Surface Finish and Surface Integrity, en ASM Metals Handbook Vol.16, "Machining", pp. 19-36, 1989.
4. H. Dagnall, "Exploring Surface Texture", Taylor-Hobson, 1986.
5. Cornet y J.-P. Deville, "Physique et Ingenierie des Surfaces", EBP Sciences, Francia, 1998.
6. Xavier Guerrero, Carlos Guerrero, Moisés Hinojosa y René Garza, "Análisis de Superficies de Alambón de Cobre con Microscopía de Fuerza Atómica", INGENIERIAS, Vol. III. 6, pp. 3-7, 2000.
7. Moisés Hinojosa, Elisabeth Bouchaud y Bernard Nghiem, "Rugosidad a Larga Distancia en Superficies de Fractura de Materiales Heterogéneos", INGENIERIAS, Vol. III. 7, pp. 16-21, 2000.