

Fractales: fundamentos y aplicaciones

Parte II. Aplicaciones en Ingeniería de materiales

Carlos Guerrero, Virgilio González*

Abstract

In the second part of this article about fractals, we focus our attention in the application of this tool to the analysis of surface phenomena such as fracture, roughness, crack propagation, etc. obtained results on fracture surfaces of plastic materials and aluminum are presented.

Keywords: plastic, aluminum, self-affinity, fractal, roughness, fracture surface

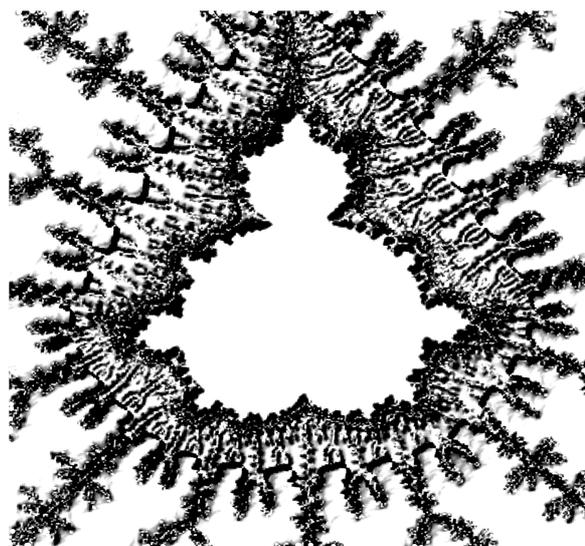
En la primera parte de este artículo y con la intención de lograr una mejor comprensión de diversos fenómenos de la naturaleza, se introdujeron los fundamentos de la geometría fractal, estableciéndose ésta como un complemento a la geometría euclidiana. Conceptos como dimensión fractal, auto-similitud y auto-afinidad fueron utilizados para explicar características de escalamiento de diferentes sistemas.

El objetivo de esta segunda parte consiste en la aplicación de estos conceptos en el análisis de algunos fenómenos que se presentan en la superficie de los materiales, ejemplos, fractura, rugosidad, propagación de grietas, etc.

Este trabajo se enmarca dentro de una de las líneas de investigación que se desarrollan en el Programa de Doctorado en Ingeniería de Materiales (DIMAT) de la FIME y en la cual trabajan desde hace algunos años varios investigadores y estudiantes del Programa.

ANTECEDENTES

De la superficie de los materiales dependen muchas de sus propiedades, ejemplo adhesión, fricción, desgaste, permeabilidad, etc. En efecto,



son las superficies las que están en contacto con el medio ambiente, y por mucho, son las interacciones existentes entre ambas las responsables del comportamiento de los materiales. La información que se puede extraer de la superficie se puede relacionar con la microestructura y de ahí con las propiedades mecánicas del material. En el caso particular de la fractura de superficies, el análisis de la misma se realiza normalmente mediante la fractografía, la cual puede proporcionar entre otras cosas, el origen de la fractura, la dirección de propagación, el tipo de carga que la causó, etc. El técnico que realiza la fractografía utiliza una combinación de su experiencia y patrones de referencia (fractogramas) para identificar las características más sobresalientes de la superficie de fractura. Cuando la fractura no se ajusta a un patrón reconocido, el proceso de análisis puede ser muy difícil y altamente subjetivo.

*

Doctorado en Ingeniería de Materiales, FIME-UANL.

Las superficies de fractura usualmente consisten en una colección de patrones repetidos, ejemplos, fracturas, fisuras, estrías, hoyos, maclas, defectos intergranulares, etc. La fractografía cuantitativa pretende traducir estas características a una forma paramétrica, y es ahí donde la geometría fractal tiene cabida, ya que una de las técnicas más utilizadas en la actualidad para el análisis de fractura se basa en la obtención de los perfiles de la superficie generados durante dicha fractura, los cuales a su vez se pueden caracterizar mediante el exponente de auto-afinidad o de rugosidad, parámetro que, de acuerdo a lo establecido en la parte I de este documento, es característico de un sistema autoafín y por ende íntimamente relacionado con la dimensión fractal.

Con la llegada del Microscopio de Fuerza Atómica, AFM por sus siglas en inglés, el análisis de la superficie de materiales no conductores se mejoró notablemente. Esta técnica permite la medición de los perfiles de altura generados en las superficies de los materiales en escalas que van desde los nanómetros hasta varios cientos de micras. A continuación se discutirá el comportamiento autoafín que presentan las superficies de fractura de algunos plásticos y del aluminio. Todos los perfiles de altura analizados se midieron con el AFM

RESULTADOS

Superficies de fractura en polipropileno y poliestireno

Los materiales bajo estudio fueron polipropileno semicristalino, PP, y poliestireno amorfo, PS. Se prepararon varias muestras al hacer pasar estos materiales por un capilar; dichas muestras se sumergen en nitrógeno líquido alrededor de 15 minutos para después fracturarlas mediante flexión

sin ningún control sobre la carga aplicada. Los datos topográficos se obtuvieron utilizando un AFM en modo contacto variando la longitud del barrido desde 2.3 hasta 10 micras. Para cada imagen se analizaron al menos 100 perfiles de 512 píxeles cada uno. Ver figura 1. El exponente de rugosidad promedio se calculó utilizando el método de ventanas de ancho variable. En este método, un perfil de longitud L se divide en ventanas o "bandas" cuyo ancho es r . Se calcula la desviación estándar de las alturas, $\sigma(i)$, obteniéndose el promedio de todas las bandas posibles al variar el origen, siempre con r constante, de acuerdo a la ecuación (1)

$$W(r) = \left(\frac{1}{Nd} \right) \sum_{i=1}^{Nd} \sigma(i) \quad (1)$$

donde Nd es el número de puntos.

El exponente de rugosidad ζ se obtiene de un gráfico logarítmico de $W(r)$ vs- r de acuerdo a la ecuación (2)

$$W(r) \cong r^{\zeta} \quad (2)$$

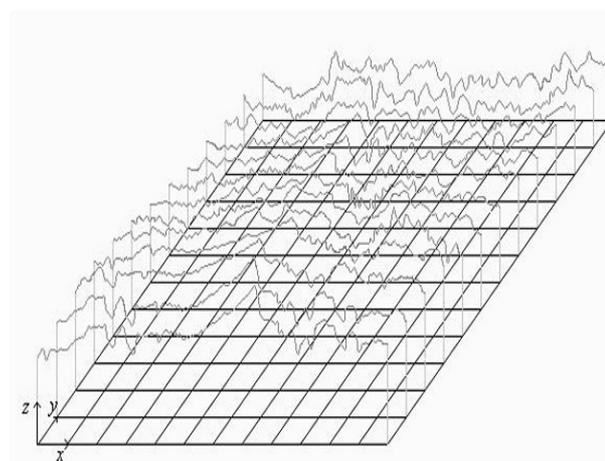


Fig. 1. Ejemplos de perfiles de alturas generados con el Microscopio de Fuerza Atómica.

En la figura 2 se puede ver una imagen típica en (3-D) de una superficie de fractura de PP. Se observa claramente la irregularidad de la superficie a diferentes longitudes de barrido.

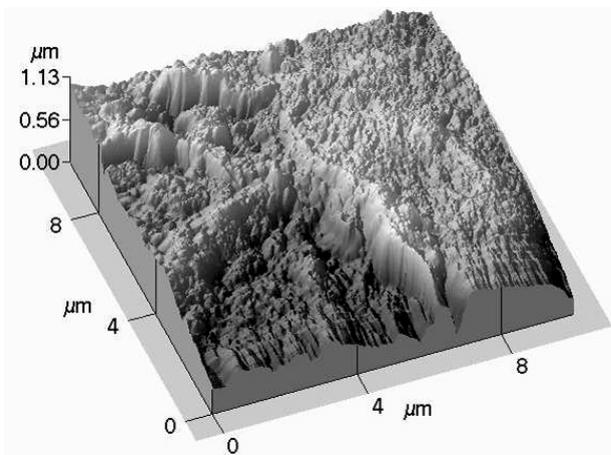


Fig. 2. Imagen del AFM que muestra la superficie de fractura del polipropileno.

El análisis de autoafinidad se efectuó sobre todos los perfiles de alturas, algunos de los cuales se muestran en la figura 3.

Los resultados de este análisis se presentan en la figura 4.a para las superficies de fractura del PP y en la figura 4.b para la del PS. Tal y como se esperaba, la relación entre la desviación estándar y el tamaño de las bandas corresponde a una línea recta, la cual se extiende sobre dos décadas, desde 2×10^{-2} hasta 1×10^0 micras para el PP, y desde 6×10^{-2} hasta 2×10^0 micras para el PS. La pendiente de la línea corresponde al exponente de rugosidad, ζ . Para las muestras de PP $\zeta = 0.788 \pm 0.008$ y para el PS $\zeta = 0.810 \pm 0.023$.

En ambos casos, los exponentes medidos concuerdan muy bien con el proclamado exponente universal de 0.8 reportado para superficies de fractura de materiales no poliméricos.

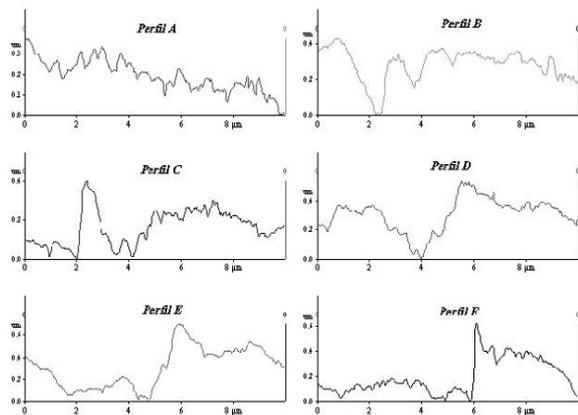
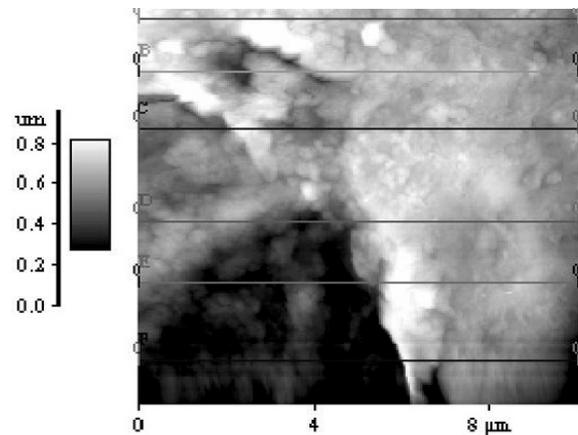


Fig. 3. Algunos de los perfiles de altura que fueron considerados en el análisis de auto-afinidad (a) imagen en 2-D de la figura 2. (b) perfiles marcados en (a).

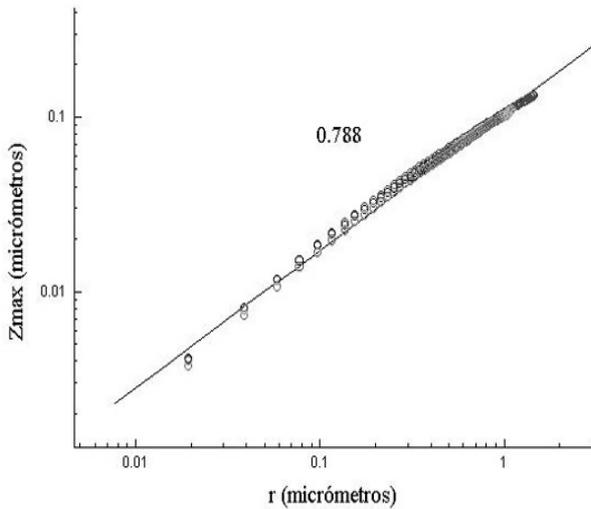


Fig. 4.a. Análisis de auto-afinidad en las superficies de fractura de polipropileno.

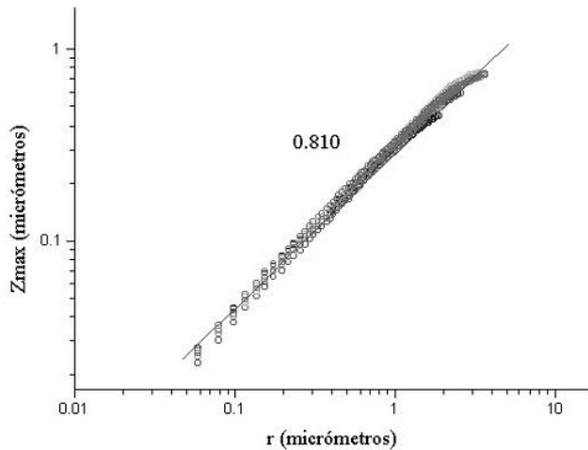


Fig. 4.b. Análisis de auto-afinidad en las superficies de fractura de poliestireno.

Superficies de fractura en aluminio

Para estas pruebas, el material empleado consistió en una aleación de aluminio comúnmente utilizada en la industria automotriz, la aleación A319. La superficie de fractura se obtuvo mediante ensayos de impacto, realizándose el análisis cuantitativo siguiendo tres técnicas diferentes: Perfilometría, AFM, y Microscopía Electrónica de Barrido, SEM. En este último caso, una de las caras de la muestra fracturada se recubre con una capa de Níquel, seccionándose enseguida, para después pulirse en un plano perpendicular a la dirección de propagación de la fractura. De las observaciones en el SEM se obtuvieron imágenes digitales de 1024 pixeles de largo en un rango de aumentos entre 50X y 2,000X, extrayéndose los perfiles de alturas mediante el análisis de imágenes. La técnica de Perfilometría se utilizó para cubrir escalas de longitud de milímetros. Los perfiles típicos que se obtienen con este método poseen alrededor de 10,000 puntos.

De nueva cuenta, el análisis de auto-afinidad se efectuó siguiendo el método de ventanas de ancho variable, pero ahora el criterio a evaluar consistió en la diferencia entre la alturas máxima y mínima, $\Delta Z(i)$, calculada en cada banda y promediada entre todas las bandas posibles al variar el origen, manteniendo r constante

$$Z(r) = \left(\frac{1}{Nd} \right) \sum_{i=1}^{Nd} \Delta Z(i), \quad (3)$$

El exponente de rugosidad se obtiene también del gráfico logarítmico de $Z(r)$ vs- r de acuerdo a la ecuación 4.

$$Z(r) \cong r^\zeta \quad (4)$$

La figura 5.a corresponde a una micrografía obtenida con el SEM en donde se observa el recubrimiento de níquel sobre el perfil de la fractura. Además de servir como protección a la superficie original, la capa de níquel actúa como contraste con respecto a la aleación de aluminio, facilitando la extracción de los perfiles de altura.

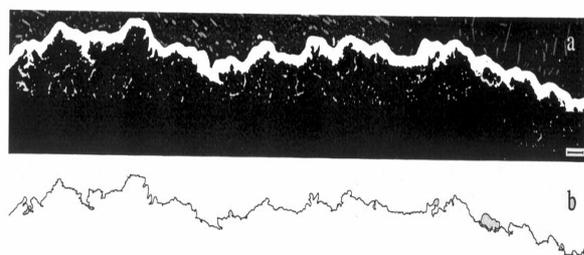


Fig. 5. Imagen de SEM mostrando (a) el recubrimiento de níquel sobre la superficie de aluminio y (b) el perfil de alturas correspondiente.

La figura 6 muestra un barrido de 5 micras de la fractura del material según es captada por el AFM.

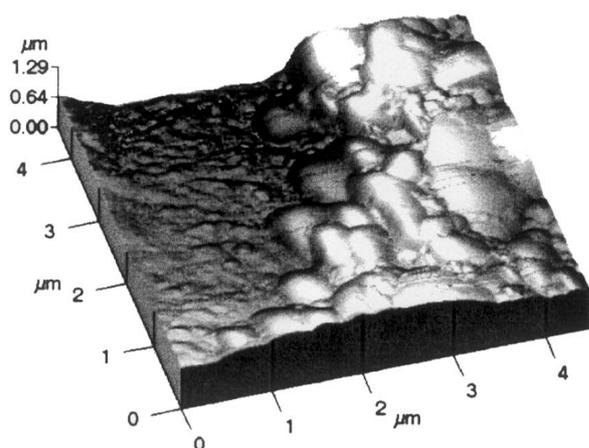


Fig. 6. Imagen del AFM en (3-D) mostrando la superficie de fractura del aluminio.

Los resultados del análisis de auto-afinidad se presentan en la figura 7.

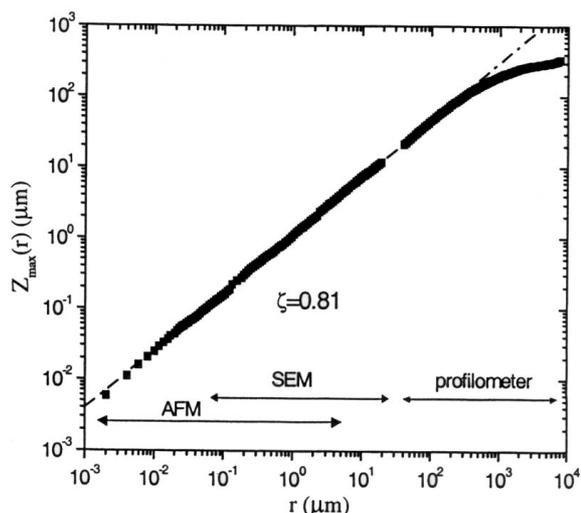


Fig. 7. Curva mostrando el análisis de auto-afinidad con todos los datos.

Ahí se aprecian las escalas de longitud que abarcan cada una de las técnicas, desde 2nm hasta 10 μm con el AFM, desde 0.06 hasta 30 con el SEM y desde 40 μm hasta 1 cm con el perfilómetro. Es clara la compatibilidad que existe entre todas las mediciones, presentándose una sola curva continua con pendiente del orden de 0.81, valor bastante cercano al ya mencionado de 0.8 reportado para fractura en varios tipos de materiales. La longitud en la cual se cumple el régimen de autoafinidad es de seis órdenes de magnitud, con un límite máximo del orden de 400 μm. Se pretende identificar este valor con el tamaño de grano del material.

En la actualidad, esta línea de investigación se enfoca, además de establecer el carácter autoafín de las superficies de fractura de otros materiales como el vidrio y algunos cerámicos, hacia una determinación más precisa de las longitudes de

correlación de los diferentes sistemas analizados, con la intención de corroborar la hipótesis de que esta longitud corresponde al valor de las heterogeneidades más grandes que se presentan en la superficie del material.

En lo referente a los materiales plásticos, es de sumo interés el determinar cómo el grado de cristalinidad afecta el valor del exponente de rugosidad en la superficie, así como la caracterización de los frentes de propagación de grietas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a M. Hinojosa, E. Reyes y J. Aldaco su valiosa participación en la determinación de algunos resultados reportados en este documento.

LECTURAS RECOMENDADAS

1. Xavier Guerrero, Propagación de grietas autoafines en una aleación de aluminio: caso bidimensional, Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León, México (2001).
2. Jorge Aldaco, Autoafinidad de superficies de fractura en una aleación aluminio-silicio, Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México (2000).
3. Edgar Reyes, Autoafinidad de superficies de fractura en materiales plásticos, Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México (1999).
4. Oswaldo Montelongo, Estudio de microestructuras dendríticas mediante análisis fractal, Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México (1998).
5. Jesús Garza, Caracterización fractal en fronteras de grano de materiales cristalinos utilizando microscopía electrónica, Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México (1997).
6. Moisés Hinojosa, Aplicación de geometría de fractales a la descripción de microestructuras metálicas, Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México (1996).