

Autoafinidad de superficies de fractura del vidrio

Moisés Hinojosa Rivera, Leonardo Chávez Guerrero *

Abstract

This article depicts glass fracture surfaces as an example of natural fractals. The fractal character of the different regions of the fracture surface is discussed and characterized, first qualitatively and then quantitatively. The self-affine analysis is performed starting from height profiles obtained using atomic force microscopy. The variable bandwidth method is briefly described and applied to the determination of the roughness exponent and the correlation length.

Keywords: glass, fracture surfaces, self-affinity, fractals, roughness exponent.

INTRODUCCIÓN

Las superficies de fractura de los materiales heterogéneos son objetos fractales naturales cuya principal característica es la invarianza escalar.¹⁻⁷ Si una parte de un objeto fractal natural se separa de él y se amplía, dicha parte lucirá igual que el cuerpo original, estadísticamente hablando. Por ejemplo, una imagen de microscopía electrónica de barrido (MEB) de una superficie de fractura en alta magnificación luce muy similar a una imagen en baja magnificación, figura 1. Si no se especifica la magnificación, aún los especialistas vacilan en su intento de discernir entre las imágenes mostradas en dicha figura

Los fractales residen en la frontera entre el orden de la geometría euclidiana y el desorden total aleatorio. Los objetos euclidianos poseen dimensiones expresadas por números enteros, mientras que los fractales poseen dimensiones fraccionarias. Una superficie plana (euclidiana) tiene dimensión 2, al ser cortada se obtiene una línea o perfil de dimensión 1. Una superficie fractal

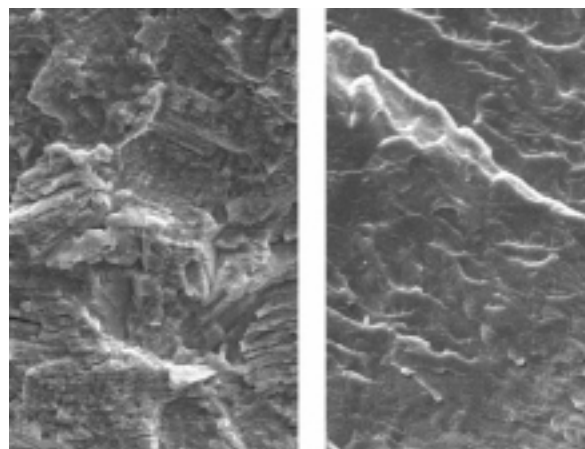


Fig. 1. Imágenes de superficies de fractura vistas a diferentes magnificaciones en MEB.

posee dimensión entre 2 y 3. A mayor irregularidad, mayor es la dimensión fractal. Si se extrae un perfil de alturas de una superficie fractal, éste tendrá una dimensión entre 1 y 2. En la práctica es conveniente, y generalmente más fácil, analizar el carácter fractal de las superficies estudiando perfiles de alturas extraídos de ellas.

AUTOAFINIDAD Y EL EXPONENTE DE RUGOSIDAD

Los fractales matemáticos son autosimilares. Los fractales naturales no son autosimilares en sentido estricto, solo lo son *estadísticamente*, se dicen que son *autoafines*. Manifiestan escalamiento anisotrópico. Si se observa un perfil de un micrómetro de longitud con alturas del mismo orden, no se observarán en general alturas cien veces mayores si se analiza un perfil de una longitud de cien micrómetros.

El concepto de dimensión fractal no puede aplicarse en sentido estricto a objetos autoafines

*

Doctorado en Materiales de la FIME-UANL.

como las superficies de fractura. Dichos objetos deben describirse mediante una “dimensión de autoafinidad”. En la práctica se calcula el llamado *exponente de Hurst* también llamado *exponente de rugosidad*, que está relacionado a la dimensión fractal mediante la relación:

$$\zeta = 2 - D \quad (1)$$

dónde ζ es el exponente de rugosidad y D es la dimensión fractal del perfil. Una superficie plana tiene $D = 2$ y $\zeta = 0$; una típica superficie de fractura muestra $D = 1.2$ y $\zeta = 0.8$.

FRACTALES Y FRACTURAS

En 1984 Mandelbrot⁸ exploró cuantitativamente por primera vez el carácter fractal de las superficies de fractura de aceros sometidos a diferentes tratamientos térmicos y reportó una correlación entre la dimensión fractal y la tenacidad a la fractura, propiedad que fue estimada mediante la energía de impacto. Estos resultados, aunque fueron cuestionados posteriormente, iniciaron una nueva era en las disciplinas de la fractografía y la mecánica de la fractura. Desde entonces el análisis de la autoafinidad de las superficies de fractura representa un campo de investigación muy activo,⁹ que se ha enriquecido con el desarrollo de modernos y sofisticados métodos estadísticos y matemáticos.

Existen diversos métodos para analizar la autoafinidad de las superficies de fractura. La mayor parte de ellos emplean perfiles extraídos de las superficies a través del uso de alguna técnica experimental.¹⁰ Uno de los métodos más confiables es el método de ventanas de ancho variable.¹¹ El perfil se divide en franjas o ventanas de tamaño r . Se calcula para cada ventana la cantidad Z_{max} , que es la diferencia entre la máxima y la mínima altura;

promediando para todas las ventanas posibles. Variando el tamaño de las ventanas se obtiene la distribución $Z_{max}(r)$. Para un perfil autoafín se cumple la siguiente ley de potencia:

$$Z_{max}(r) \propto r^{\zeta} \quad (2)$$

Un gráfico *log-log* de $Z_{max}(r)$ vs. r permite verificar la validez de esta ley; si la relación se cumple el perfil es autoafín y el exponente ζ viene dado por la pendiente de la línea recta en el régimen autoafín.

Las superficies de fractura son autoafines para longitudes de escala menores a la llamada *longitud de correlación*, más allá de la cual la superficie puede considerarse un objeto euclidiano plano. Dicha longitud de correlación puede determinarse también del gráfico de $Z_{max}(r)$ vs. r . Las superficies de fractura del vidrio son autoafines y su exponente de rugosidad así como la longitud de correlación pueden determinarse mediante el método descrito.

LAS TRES ZONAS EN LA FRACTURA DEL VIDRIO.

En la región del origen de la fractura en una superficie de ruptura de vidrio es posible, aún a simple vista, distinguir tres zonas. Los fractógrafos las llaman zona “espejo”, zona “difusa” y zona “fibrosa”.¹² En la figura 2 se muestran dichas zonas tal como se observan en la fractura de un vidrio común vista al MEB. A partir del análisis de estas zonas se pueden hacer inferencias sobre los niveles de esfuerzo y las condiciones cinéticas de propagación. La zona “espejo” es llamada así por su notable reflectividad y tersura, tradicionalmente se le describe como si fuera un objeto euclidiano plano. Las zonas difusa y fibrosa presentan una irregularidad o rugosidad perceptible a simple vista.

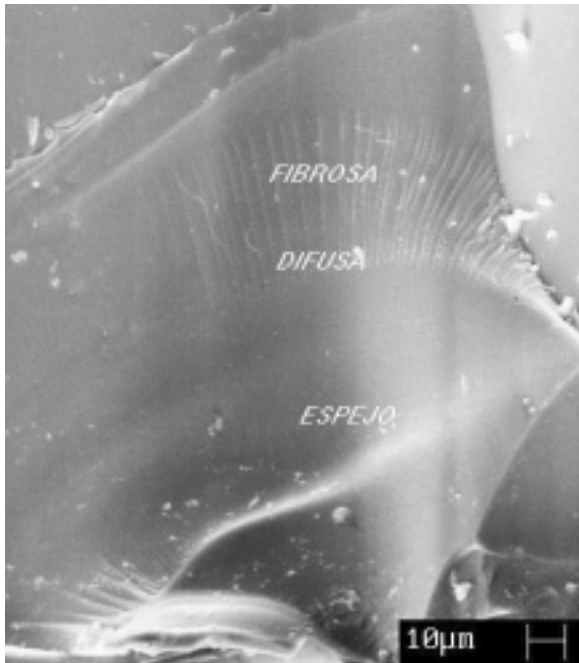


Fig. 2. Las tres zonas características en la fractura del vidrio.

LA MICROSCOPIA DE FUERZA ATÓMICA

La microscopía de fuerza atómica (MFA) es una herramienta muy poderosa capaz de proveer los datos topométricos¹³ necesarios para el análisis de autoafinidad de las superficies de fractura del vidrio, incluso en la zona espejo. La figura 3 muestra una imagen de MFA de la región especular en la superficie de fractura de un vidrio común que fue fracturado en flexión. Esta superficie es claramente irregular, no es plana como tradicionalmente se describe cuando se le observa a simple vista o mediante técnicas como microscopía óptica o electrónica. La MFA permite la observación y, mejor aún, la cuantificación de la rugosidad en escalas submicrométricas.

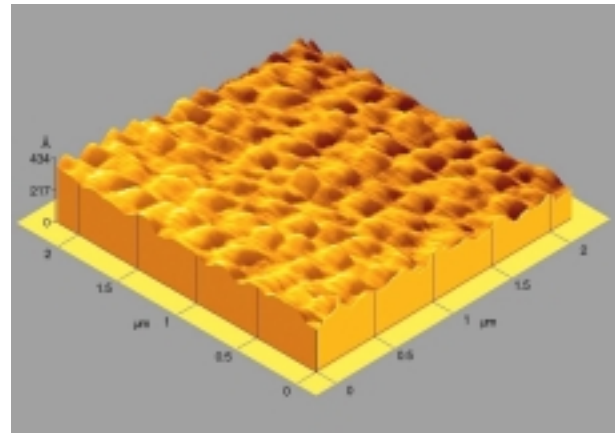


Fig.3 Imagen de microscopía de fuerza atómica de la zona especular.

EL ANÁLISIS AUTOAFIN

En la figura 4 se muestran dos perfiles de alturas extraídos de diferentes regiones de una superficie de fractura de vidrio, ambos perfiles constan de 512 puntos o píxeles, pero son de diferente longitud, la escala en la ordenada es la misma, aunque está en unidades arbitrarias.

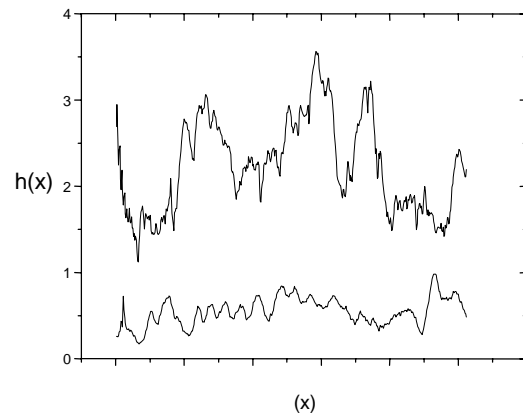


Fig. 4. Perfiles extraídos en la zona especular (abajo) y en la zona difusa (arriba).

En la parte superior se muestra un perfil de 5 micrómetros de longitud perteneciente a la región llamada “difusa”. El perfil en la parte inferior tiene una longitud de medio micrómetro y corresponde a la región especular. Ambos perfiles lucen muy similares en su irregularidad, la única diferencia radica en la amplitud y la longitud de escala de análisis, existe una diferencia de un orden de magnitud en la longitud y en la distancia entre puntos, nótese que las alturas no manifiestan esa misma diferencia de escalamiento. Estos perfiles claramente muestran los conceptos de autoafinidad de manera cualitativa y demuestran que las superficies de fractura del vidrio son bien descritas como objetos fractales naturales.

El carácter autoafín de los perfiles se revela y cuantifica en la figura 5. Este gráfico corresponde al análisis de perfiles pertenecientes a la región especular. Es evidente que la cantidad Z_{max} obedece la ley de potencia dada por la ecuación (2). Los perfiles analizados son incuestionablemente

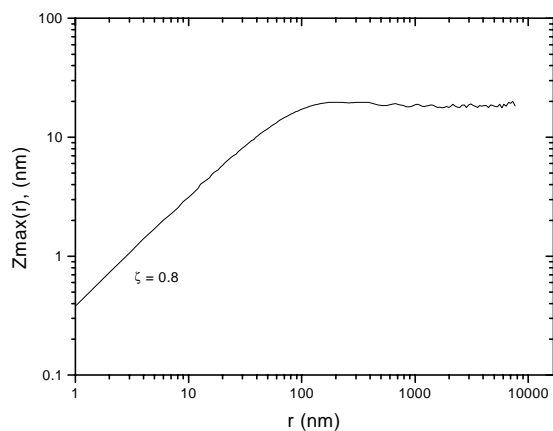


Fig. 5. Curva de autoafinidad correspondiente a la región especular.

autoafines. El exponente de rugosidad tiene un valor de 0.8. Este resultado no es sorprendente ya que se han reportado valores similares para las superficies de fractura de diversos materiales fracturados en condiciones cinéticas similares. Este exponente es considerado *universal*¹⁴ aunque existe actualmente una controversia fuerte al respecto.

En la figura 5 puede verse además que la ley de potencia deja de ser válida para longitudes de escala mayores a 100 nanómetros. Este es el valor de la longitud de correlación e implica que la región especular puede considerarse plana para longitudes de escala mayores a este valor. Nótese que este valor es menor que la longitud de onda de la luz visible. Se ha demostrado que la longitud de correlación tiene fuerte relación con el tamaño de grano en algunos metales.¹⁵⁻¹⁸ En polímeros parcialmente cristalinos este parámetro parece estar ligado al tamaño de las esferulitas.¹⁹⁻²¹ Resultados recientes sugieren que en el vidrio opalino este parámetro corresponde al tamaño de las partículas opacificantes.

SUMARIO

En resumen, las superficies de fractura del vidrio son objetos fractales naturales, anisotrópicos.

El análisis de su autoafinidad puede realizarse mediante métodos estadísticos aplicados a perfiles de alturas obtenidos mediante microscopía de fuerza atómica.

El exponente de rugosidad y la longitud de correlación son los parámetros autoafines que describen y cuantifican el carácter fractal de estas superficies.

REFERENCIAS

1. B.B. Mandelbrot, *The Fractal Geometry of Nature*. New York, Freeman , 1982.
2. Virgilio A. González y Carlos Guerrero, “Fractales: Fundamentos y Aplicaciones. Parte I, Concepción Geométrica en la Ciencia e Ingeniería”, *Ingenierías*, Vol. IV, No. 10, pp. 53-59, Enero-Marzo 2001. www.uanl.mx/publicaciones/ingenierias/10/
3. C. Guerrero y V. González, “Fractales: Fundamentos y Aplicaciones. Parte II, Aplicaciones en Ingeniería de Materiales”, *Ingenierías*, Vol. IV, No. 12, pp. 15-20, Julio-Septiembre 2001. www.uanl.mx/publicaciones/ingenierias/12/
4. Ubaldo Ortiz Méndez y Moisés Hinojosa Rivera. *Geometría de Fractales y Autoafinidad en Ciencia de Materiales*, *Ingenierías*, Vol. I, No. 1, pp. 15-21, 1998. www.uanl.mx/publicaciones/ingenierias/1/
5. Moisés Hinojosa y Ubaldo Ortiz, “Geometría de Fractales Aplicada a la Descripción de Microestructuras Metálicas”, *Ciencia UANL*, Vol. I, No. 3, 1998.
6. J. Feder, *Fractal*, Plenum Press, N.Y. 1988.
7. J.C. Russ, *Fractal Surfaces*, New York, Plenum Press, 1994.
8. B. B. Mandelbrot, D. E. Passoja y A. J. Paullay, “Fractal Character of Fracture Surfaces of Metals”, *Nature*, Vol. 308, pp. 721-722, 1984.
9. E. Bouchaud, “Scaling Properties of Cracks”, *J. Phys.:Condens. Matter* Vol. 9, pp. 4319-4344, 1997.
10. Francisco J. Garza, Tesis de Licenciatura, FIME-UANL, 1999.
11. J. Schmittbuhl, J.P. Vilotte y S. Roux, “Reliability of Self-Affine Measurements”, *Phys. Rev. E*, Vol. 51 131, 1995.
12. D. Hull, *Fractography*, Cambridge U.P., 1999.
13. Moisés Hinojosa, Martín Edgar Reyes Melo, “La Rugosidad de las Superficies: Topometría”, *Ingenierías*, Vol. IV, No. 11, pp. 27-33, 2001. www.uanl.mx/publicaciones/ingenierias/11/
14. E. Bouchaud, G. Lapasset y J. Planés, *Europhys Lett.* , Vol. 13, p. 73 1990.
15. M. Hinojosa, E. Bouchaud y B. Nghiem. *Materials Research Society Symposium Proceedings*, Vol. 539, pp. 203-208, 1999.
16. Moisés Hinojosa, Elisabeht. Bouchaud y Bernard Nghiem, “Rugosidad a Larga Distancia en Superficies de Fractura de Materiales Heterogéneos”, *Ingenierías*, Vol. III, No. 7, pp. 27-33, Abril-Junio 2001. www.uanl.mx/publicaciones/ingenierias/7/
17. Jorge A. Aldaco, Tesis de Maestría, FIME-UANL, 2000.
18. M. Hinojosa, J. Aldaco, U. Ortiz, V. González, “Roughness Exponent of the Fracture Surface of an Al-Si Alloy”, *Aluminum Transactions*, Vol. 3, pp. 53-57, 2000.
19. Edgar Reyes, Tesis de Maestría, FIME-UANL, México, 1999.
20. M. E. Reyes y C. Guerrero , “Autoafinidad de Superficies de Fractura en Materiales Plásticos”, *Ingenierías*, Vol. IV, No. 10, pp. 27-37, 2001. www.uanl.mx/publicaciones/ingenierias/10/
21. E. Reyes, C. Guerrero, V. González y M. Hinojosa, “Self-Affine Measurements on the Fracture Surface of Plastics Materials by AFM”, *Materials Research Society Symposium Proceedings*, Vol. 578, pp. 357-361, 2000.