

Hojuelas de grafito en un hierro fundido gris: Análisis fractal y estadístico

Fabiola Sánchez*, Moisés Hinojosa*, Virgilio González*

Abstract

A statistical and fractal analysis of the graphite flakes in the microstructure of a gray iron is presented in this work. The morphological parameters equivalent diameter, area, perimeter, shape factor and length were determined by image analysis of optical micrographs. The statistical distributions of these parameters do not fit to gaussian curves, showing high skewness and dispersion. Fractal analysis was performed applying the box-counting method to the binary images of the flakes, the results show and quantify the fractal character of the graphite flakes. Two fractal dimensions were detected: the texture dimension associated to the fine irregularities of the flake boundaries, and the structure dimension, which describes the global morphological irregularity. The unusually high value of the structure dimension, $D=1.71$, seems to reflect the also unusually high average value of the shape factor. The cut-of length, which indicates the point of intersection of the structure and texture regimes, shows a value very similar to the average value of the parameter length.

INTRODUCCIÓN

El hierro fundido gris¹⁻³ es uno de los materiales más empleados, su nombre se debe a la apariencia de sus superficies al romperse. Esta aleación ferrosa contiene en general más de 2% de carbono y más de 1% de silicio, además de manganeso, fósforo y azufre. Una característica distintiva del hierro gris es que el carbono se encuentra en general como grafito, adoptando formas irregulares descritas como “hojuelas”, este grafito es el que da la típica coloración gris a las superficies de fractura en las piezas elaboradas con este material. Las propiedades físicas y en particular las mecánicas

varían dentro de amplios intervalos respondiendo a factores como la composición química, rapidez de enfriamiento después del vaciado, tamaño y espesor de las piezas, práctica de vaciado, tratamiento térmico y parámetros microestructurales como la naturaleza de la matriz y la forma y tamaño de las hojuelas de grafito.

Las hojuelas adoptan diferentes patrones irregulares, o *tipos*. El tipo y tamaño de hojuela se determina de manera tradicional por simple comparación contra el patrón ASTM (American Society for Testing of Materials), norma A247. Esto se realiza mediante observaciones de microscopía óptica a 100X sobre muestras en condición de pulido a espejo, sin ataque químico. En general se habla de cinco tipos de hojuelas, denominados A, B, C, D y E, como se ve en la figura 1.

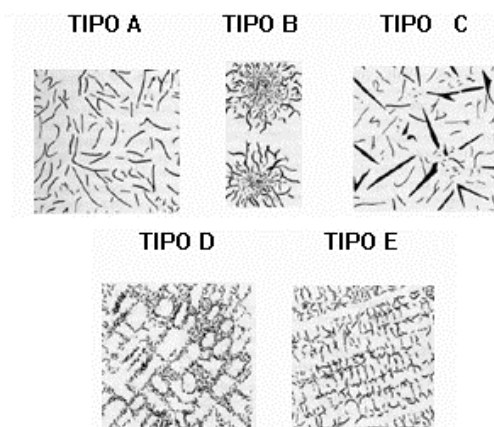


Fig. 1. Tipos de hojuelas en los hierros grises, según la clasificación ASTM.

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

Las normas hacen referencia a ocho tamaños de hojuela, asignándoles números del 1 al 8, Tabla I.

Tabla I
Tamaños de hojuelas AFS*-ASTM**

Tamaño	Long. de las hojuelas más largas en pulg. A 100X.
1	4 o más
2	2-4
3	1-2
4	½ - 1
5	¼ - ½
6	1/8- ¼
7	1/16-1/8
8	1/16 o menos

* American Foundrymen Society

** American Society for Testing of Materials

En general para la mayoría de las aplicaciones se prefieren las hojuelas tipo A de tamaño “pequeño”, los tamaños grandes reducen la resistencia y ductilidad del hierro como resultado de interrumpir seriamente la continuidad del material.

El carácter irregular de las hojuelas de grafito se presta para el análisis mediante la geometría fractal. Esta geometría describe y cuantifica las formas irregulares que presentan los objetos en la naturaleza.^{4,6} La complejidad morfológica se cuantifica mediante el parámetro *dimensión fractal*, que indica la eficiencia con que un objeto llena el espacio en el que está contenido. A diferencia de la más conocida dimensión topológica o euclidiana, la dimensión fractal es fraccionaria y casi siempre mayor que la topológica. En la figura 2 se muestra el objeto fractal llamado copo de nieve de Von Koch, la dimensión fractal de su curva perimetral es $D=1.2618$.

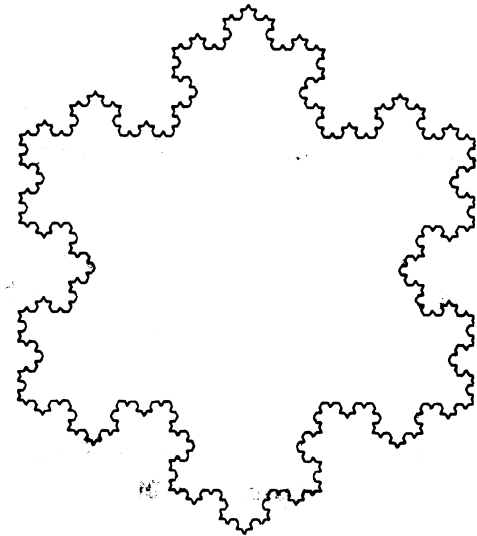


Fig. 2. Copo de nieve de Von Koch

La geometría fractal se ha empleado para el análisis de una diversidad de elementos microestructurales como fronteras de grano⁷, dendritas⁸ y muchos otros. En general se combina con el análisis de imágenes, mismo que tradicionalmente se emplea para la determinación de parámetros morfológicos euclidianos en lo que se conoce como metalografía o materialografía cuantitativa. Como antecedente directo de este trabajo, Lu⁹ estudió las morfologías del grafito en distintos tipos de hierros fundidos aplicando relaciones área-perímetro, Montelongo aplicó un método similar a las dendritas en una aleación vaciada de aluminio. En nuestro trabajo se aplica el análisis fractal a las hojuelas de grafito mediante el método de conteo de celdas para la determinación de la dimensión fractal. Se realiza además un análisis estadístico de algunos parámetros morfológicos determinados por procedimientos convencionales de análisis de imágenes.

EXPERIMENTACIÓN

El material empleado en el presente trabajo es una fundición de hierro gris cuya composición química, determinada por espectroscopía de emisión óptica, se presenta a continuación (% peso): C, 3.72; Si, 2.61; Mn, 0.71; P, 0.15; S, 0.128; Cr, 0.143. El contenido de carbono se determinó en un analizador de carbono (*LECO Carbon Analyzer*). Se prepararon muestras para observación metalográfica utilizando lijas, el pulido final se realizó mediante suspensión de diamante de 0.25 μm , no se realizó ataque químico. Las observaciones de la microestructura se llevaron a cabo en un microscopio óptico de platina invertida conectado a un equipo analizador de imágenes *LEICA Quantimet 520*. Estas observaciones se realizaron a 100 y 200X, se capturaron imágenes digitales grises de 256 tonos a 512 x 480 píxeles. La resolución de estas imágenes digitales fue de 0.952 y 0.479 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ para las magnificaciones de 100 y 200X, respectivamente. La captura de imágenes se llevó a cabo de manera tal que el mismo campo observado a 100X se cubriera mediante cuatro imágenes a 200 X.

Mediante procedimientos de edición de imágenes se detectaron y aislaron las hojuelas de grafito en las imágenes grises para obtener imágenes binarias a partir de las cuales se determinaron diversos parámetros morfológicos. Los parámetros medidos fueron: *diámetro equivalente*, D_e ; *área*, A ; *perímetro*, P ; *factor de forma*, ff ; y *longitud*, L ; estas mediciones se realizaron para las magnificaciones de 100 y 200X. El parámetro factor de forma está definido por la relación siguiente:

$$ff = \frac{1}{4\pi} \frac{P^2}{A}$$

El parámetro diámetro equivalente se obtiene mediante la relación:

$$D_e = \left(\frac{4A}{\pi} \right)^{1/2}$$

El parámetro longitud, L , corresponde al máximo diámetro de Feret, que a su vez es la distancia entre dos rectas paralelas tangentes al objeto medido.

El análisis fractal se realizó mediante el método de conteo de celdas o *box-counting* aplicado a las imágenes binarias. En este método la imagen se cubre con una serie de mallas cuadradas de tamaño δ , se cuentan las celdas que incluyen alguna parte de las hojuelas, variando el tamaño δ se obtiene la distribución de $N(\delta)$. Para objetos fractales se tiene que $N(\delta) \sim \delta^{-D}$ de donde se puede obtener la dimensión fractal, D , como la pendiente del gráfico logarítmico de $N(\delta)$ contra δ . El procedimiento fue adaptado para realizarse mediante un programa computacional, figura 3.

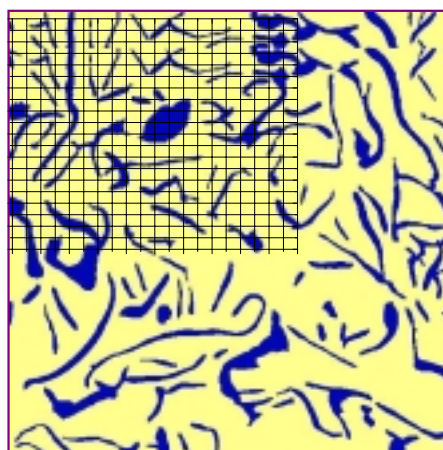


Fig. 3. El método de box-counting, ver texto.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Fig. 4(a) se muestra una micrografía típica a 100X, se aprecian las hojuelas de grafito, identificadas como hojuelas tipo A de tamaños 3 a 5, de acuerdo a la norma ASTM A247, en la figura 4(b) se muestra la correspondiente imagen binaria obtenida después del proceso de edición. Las figs. 4(c) y 4(d) muestran el aspecto de las hojuelas a 200X en las modalidades gris y binaria, respectivamente. En algunos campos de observación se detectó además la presencia de algunas hojuelas de tipo C. Esta clasificación del tipo y tamaño de hojuela aunque es muy rápida es muy subjetiva y cualitativa.

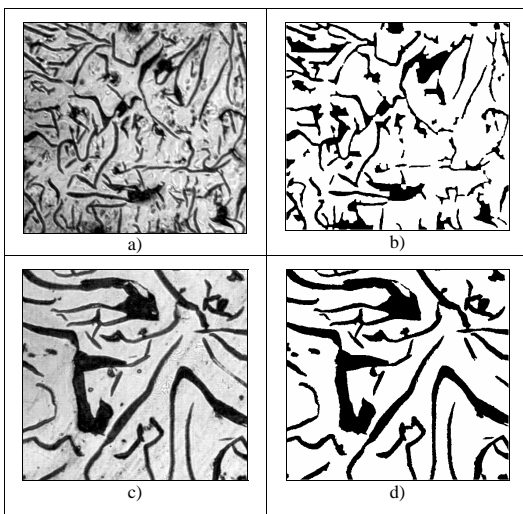


Fig. 4. (a) Microestructura típica mostrando las hojuelas de grafito, 100X.

- (b) Imagen binaria correspondiente a (a)
 (c) Hojuelas a 200X
 (d) Imagen binaria correspondiente a (c)

En la Tabla II se muestran los resultados concentrados de los diversos parámetros morfológicos determinados, estos resultados

corresponden al total de hojuelas analizadas, en este caso todas las mediciones incluidas se determinaron en las imágenes de 100X. Cualquiera de estos parámetros morfológicos cuantitativos puede ser utilizado para describir las características de las hojuelas de grafito, proporcionando una información más clara y precisa que la simple clasificación como “hojuela tipo A de tamaño 3 a 5” obtenida mediante la norma ASTM. Sin embargo es importante considerar las distribuciones estadísticas de estos parámetros cuantitativos, sobre todo si se toma en cuenta la gran dispersión de tales parámetros expresada por su desviación estándar.

Tabla II

Estadísticas de los parámetros morfológicos de las hojuelas de grafito

	Promedio	Desviación estándar
Longitud (μm)	26.8	22.8
Perímetro (μm)	100.9	132.2
Área (μm^2)	124.4	211.3
Diámetro equivalente (μm)	10.6	6.8
Factor de forma	7.2	7.6

Nótese en la Tabla II que para todos los casos la desviación estándar es del mismo orden que la media, con el caso extremo del área, en el que la desviación estándar es casi el doble que el promedio.

Un análisis más completo requiere conocer la forma de las distribuciones estadísticas. En la figura 5 se muestran los histogramas correspondientes a las distribuciones estadísticas de los parámetros longitud, perímetro, área y diámetro equivalente. En dichos histogramas se indica la media y la desviación estándar, mostrándose además el ajuste a

una distribución normal. La primera observación interesante es que las distribuciones no se ajustan a la forma gaussiana en ninguno de los casos, las distribuciones no son normales, ni siquiera son acampanadas, son más bien sesgadas.

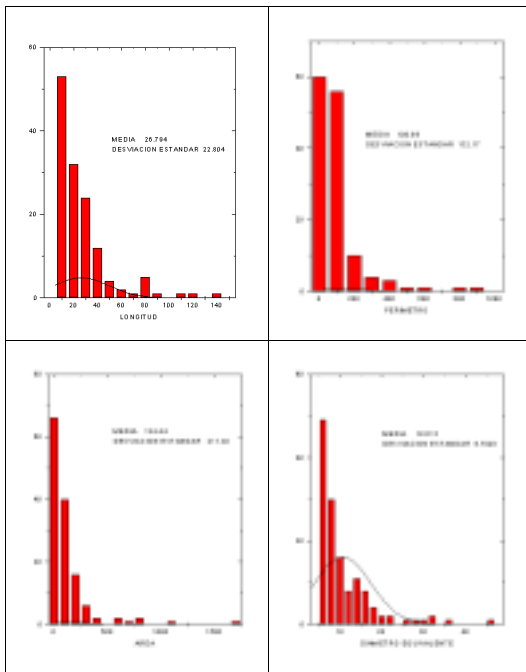


Fig. 5. Distribuciones estadísticas de los parámetros morfológicos

En la figura 6 se muestra el resultado del análisis fractal mediante el método de conteo de celdas, para una imagen típica de 100X. Los datos indican la existencia de dos regímenes con dos diferentes dimensiones fractales. En la región correspondiente a tamaños de celda finos se manifiesta una dimensión fractal con valor de 1.5, mientras que en la región de tamaños de celda grandes la dimensión fractal tiene el valor de 1.71. Estos valores indican una mayor “rugosidad” en la región de mayores tamaños de celda o menor resolución con respecto a la obtenida en la región de mayor resolución.

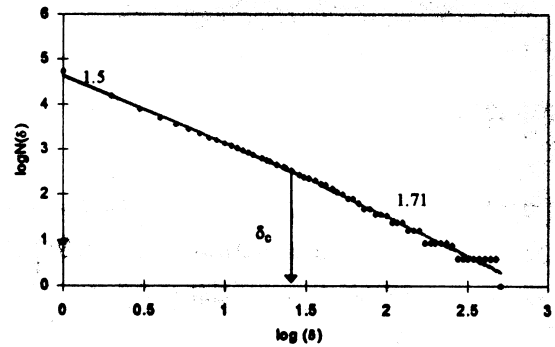


Fig. 6. Resultado del análisis fractal mediante conteo de celdas.

Los dos regímenes detectados se interceptan en el punto llamado normalmente longitud de quiebre (cut-off length), indicado en la figura con el símbolo δ_c . Las dos dimensiones fractales detectadas pueden interpretarse en los términos propuestos por Kaye [10] e Hinojosa [7], podemos identificar la dimensión existente en las escalas finas como la dimensión de textura, que refleja los detalles finos de la curva perimetral de las hojuelas, es decir, la interfase entre el grafito y la matriz. La dimensión que se manifiesta en las escalas menos finas puede interpretarse como la dimensión de estructura, asociada a la irregularidad morfológica global de las hojuelas de grafito. El valor inusualmente alto, 1.71, de la dimensión de estructura puede relacionarse a la gran irregularidad morfológica y de distribución de las hojuelas, este valor puede además estar relacionado con el factor de forma, que también es inusualmente alto, según se indica en la Tabla II.

El valor de la longitud de quiebre en la figura 6 corresponde a un tamaño de celda de 29 pixeles, que para la magnificación de 100X equivale a un tamaño de 27 μm . Resulta tentador asociar este valor al promedio del parámetro longitud, cuyo valor es de 26.8 μm según se indica en la tabla II,

sin embargo la alta dispersión de este parámetro indicada por su desviación estándar obliga a considerar con reservas tal correlación.

CONCLUSIONES

El análisis estadístico de las hojuelas de grafito revela que las distribuciones de los parámetros longitud, perímetro, área, diámetro equivalente y factor de forma no se ajustan a la distribución normal, presentando más bien una distribución sesgada. Estas distribuciones muestran una gran dispersión, del orden del valor promedio en la distribución. El análisis fractal realizado corrobora la aplicabilidad de los conceptos de geometría de fractales para describir la irregularidad de las hojuelas. Efectivamente se encuentra que las hojuelas pueden describirse como fractales naturales. Se detectó la existencia de dos dimensiones fractales. En los niveles finos la dimensión de textura describe la irregularidad del borde de las hojuelas, mientras que la dimensión de estructura se manifiesta en los niveles menos finos y refleja la morfología general de las hojuelas. El valor inusualmente alto de la dimensión de estructura se correlaciona bien con el también inusualmente alto valor del parámetro morfológico factor de forma. Si bien no es posible establecer una relación definitiva entre los parámetros fractales y la microestructura, se encuentra que el valor de la longitud de quiebre es muy cercano al valor promedio del parámetro longitud.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo otorgado por el Conacyt y la UANL a través del programa PAICYT.

REFERENCIAS

1. Metals Handbook Vol. 1, "Properties and Selection: Irons and Steels". American Society for Metals, p. 3-73, 1985.
2. Apraiz Barreiro, José. "Fundiciones" 3^a Ed., Ed. Dossat, 1981.
3. Metals Handbook Vol. 15, "Castings", American Society for Metals, p. 627-661, 1985.
4. Mandelbrot, B.B., "Fractals: Form, Chance, and Dimension", W.H. Freeman and Co. San Francisco, 1977.
5. Mandelbrot, B.B., "The Fractal Geometry of Nature", W.H. Freeman and Co. New York, 1982.
6. Barnsley, M. "Fractals Everywhere". Academic Press, Inc. San Diego, 1988.
7. Hinojosa, M. Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de Nuevo León, 1996.
8. Montelongo O. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León, 1998.
9. Lu S. Z. y Hellawell, A. *Acta Metallurgica et Materialia*, Vol. 42, No. , pp 4035-4047, 1994.
10. Kaye, B. H. "Multifractal Description of a Rugged Fineparticle Profile. *Part Char. I*, pp 14-21, 1984.