

# CARACTERIZACIÓN DE NÓDULOS DE GRAFITO USANDO MORFOLOGÍA MATEMÁTICA

F. Manriquez-Guerrero<sup>a</sup>, L. A. Morales-Hernández<sup>b</sup>, I. R. Terol-Villalobos<sup>a</sup>, A. Domínguez-González<sup>b</sup>, G. Herrera-Ruiz<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica S.C. Pedro Escobedo, Querétaro, 76700 México

<sup>b</sup> Facultad de Ingeniería Universidad Autónoma de Querétaro San Juan del Río, Querétaro, 76807 México

\*Corresponding author, E-mail: fmanriquez@cideteq.mx , Tel: 01(442)2116016, Fax: 01(442)2116001

## RESUMEN

El presente trabajo se enfoca a la caracterización de nódulos de grafito usando la técnica de procesamiento de imágenes conocida como morfología matemática. Dos parámetros son principalmente estudiados; la circularidad de los nódulos y la compacidad de la matriz. El uso de ambos criterios circularidad y compacidad permite fijar rangos cuantitativos para la forma y distribución espacial de los nódulos dentro de la matriz. Estos parámetros son fundamentales para caracterizar los nódulos de grafito dado que están íntimamente ligados al comportamiento mecánico del material (distribución de esfuerzos). Después de segmentar los nódulos, se establecen los criterios de circularidad y compacidad. Resulta interesante la forma en que se determinan ambos criterios, dado que está basada en transformaciones morfológicas básicas como son la apertura, la erosión y la dilatación. En el caso de la circularidad, esta se determina en función del número de componentes conexas de la bisectriz condicional, lo cual no requiere estrictamente hablando de una medida, mientras que en el caso de la compacidad esta se determina a partir de una granulometría calculada sobre la matriz, debido a que esta depende de la tendencia de la distribución de tamaños en la matriz.

**Palabras Claves:** Nodularidad, compacidad, grafito, bisectriz condicional, granulometría.

## GRAPHITE NODULES CHARACTERIZATION USING MATHEMATICAL MORPHOLOGY

### ABSTRACT

The present work is focused on the characterization of the graphite nodularity based on the well-known image processing technique called mathematical morphology. Two parameters are mainly studied; the circularity and compacity of the matrix. Both criteria, circularity and compacity enable to fix quantitative ranges to the shape and the spatial distribution of the nodules that are linked to the stress distribution. Once the nodules are segmented, the circularity and compacity criteria are established. The manner of determine both criteria is of great interest since they are computed using the basic morphological transformations; opening, erosion and dilation. In the case of the circularity criterion, the number of connected components of the conditional bisector inside each nodule are used to determine this criterion. Strictly speaking, this procedure does not require a measure. Whereas, the compacity criterion is determined by a granulometry study since it depends on the tendency of the size distribution on the matrix phase.

**Keywords:** Nodularity, compacity, graphite, conditional bisector, granulometry.

## INTRODUCCIÓN

La microestructura de los metales es crítica para conocer su comportamiento frente a diferentes aplicaciones, por lo que es necesaria la caracterización de parámetros microestructurales [1-4]. Los nódulos de grafito en una fundición de hierro, son un parámetro importante en la ingeniería ya que influye en las propiedades mecánicas tales como esfuerzos térmicos y mecánicos [5], resistencia al impacto [6], comportamiento a la fractura [7-8].

Recientes estudios analizan el proceso de fundición para inducir una distribución y forma de grafito con lo que mejoran las propiedades mecánicas como maleabilidad y ductilidad [9-11]; para esto es necesario discriminar la forma, al igual que saber la distribución granulométrica que presenta el grafito [12-15]. Actualmente las mediciones para el grafito y tasa de nodularidad son mediciones cualitativas, ya que se tienen cartas patrón, contra las que se compara la estructura del material a

analizar [16-18]; esto hace que estas mediciones tengan un margen de error importante ya que dependerán de la percepción y criterio del evaluador. Existen varios métodos para la determinación de la tasa de nodularidad, el método de JIS, el método ASTM A-247, el método ASF y el método de la SAE [19]. Todos ellos tienen modelos patrón contra los que hay que hacer la comparación para determinar la nodularidad de la estructura. Por ejemplo las cartas patrón de ASF, dan una precisión de  $\pm 10\%$ ; la norma ASTM caracteriza las partículas de grafito por número y letra en metalografías idealizadas para ser comparadas, permitiendo obtener un estimado de la distribución y tamaño de las partículas de grafito, (ver Fig. 1), lo cual no es confiable para controlar procesos donde la nodularidad es un factor crítico, como en la fundición de monoblocks de motores [13]. En [20] se muestra un estudio comparativo de determinación de la tasa de nodularidad por diferentes métodos y diferentes laboratorios, los métodos utilizados fueron el JIS, ASF y procesamiento de imágenes. Los resultados no fueron concluyentes, ya que hay mucha dispersión en la determinación, al igual que las mediciones entre laboratorios no muestran una tendencia. El método que se comporta de manera similar es cuando se realiza con procesamiento de imágenes.

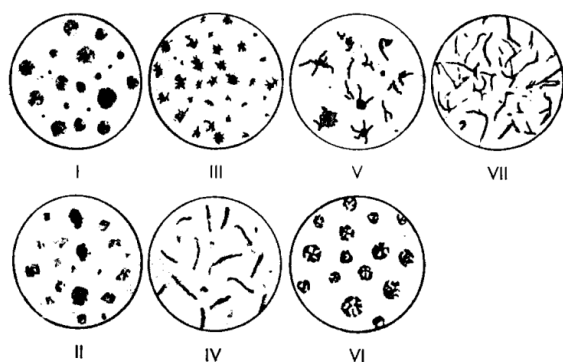


Fig. 1 Clasificación por forma de grafito en fundiciones de hierro (ASTM A 247).

En el presente trabajo se desarrolla un método para medir nódulos de grafito presentes en una fundición de hierro

nodular, basado en técnicas de procesamiento morfológico de imágenes. El sistema de procesamiento de imágenes, permite llevar a cabo de forma automática la medición de los nódulos de grafito, eliminando los errores que pueden ser introducidos por el evaluador.

## MATERIALES Y METODOS

### Objetivo

La determinación de la nodularidad se basa en la percepción de que los nódulos son lo más cercano a un círculo, de modo que es menos nodular cuando este grafito no tiende a ser circular. El presente trabajo se enfoca al desarrollo de una metodología basada en procesamiento de imágenes para cuantificar nódulos en fundición dúctil considerando los criterios de normas internacionales. Los parámetros, nodularidad y compacidad, son cuantificados vía un sistema de procesamiento de imágenes.

### Metodología

La preparación de la muestra se realizó siguiendo la metodología establecida en la norma ASTM E3. Posteriormente, las imágenes fueron adquiridas en un microscopio óptico metalográfico Nikon epiphot 200, con sistema de video integrado y una tarjeta digitalizadora (Mutech 460). Como se mencionó anteriormente, la determinación de la nodularidad esta basada en la percepción de que los nódulos son lo mas cercano a un círculo. Las cartas patrón son modelos idealizados de comparación, no se tiene un criterio de circularidad para realizar mediciones cuantitativas que permitan tener una mayor confiabilidad al momento de decidir cuando un nódulo es circular o no lo es (es decir pertenece a la clase VI o a otra clase (ver Fig 2)). Cuando se realiza de manera manual esta clasificación, el resultado depende de la percepción visual del evaluador. Sin embargo, un sistema automático basado en técnicas de procesamiento de imágenes no depende del evaluador sino de los criterios

que se introduzcan al sistema. Para determinar la circularidad en base a un procesamiento de imágenes, se propone realizar un estudio de la forma de los nódulos utilizando la noción de bisectriz condicional. En lo que concierne a la compacidad, este parámetro es más complejo dado que involucra características como son la cantidad de nódulos por unidad de área, su distribución de tamaños, así como su distribución espacial dentro de la matriz. La metodología propuesta en el presente trabajo se basa en determinar la distribución de distancias entre nódulos utilizando un estudio granulométrico de la matriz.

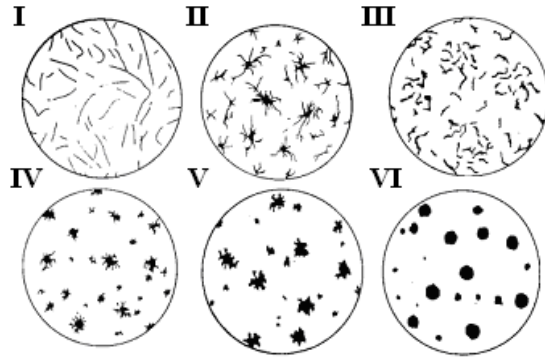


Fig. 2 Clasificación por forma de partículas de grafito (ISO 945).

### Operaciones Morfológicas Básicas

La morfología se relaciona con la estructura o la forma de objetos y se utilizan para remover rasgos de forma y tamaño dado. Los filtros morfológicos básicos son la apertura  $\gamma_{\mu B}$  y cerradura  $\phi_{\mu B}$  morfológicas usando un elemento estructural  $\mu B$  [21-22]. Donde  $B$  es un elemento estructural básico (cuadrado de  $3 \times 3$  píxeles, o recta de 3 píxeles), y  $\mu$  es un factor de escala. De esta forma el número de píxeles en el elemento estructural  $\mu B$   $(2\mu + 1) * (2\mu + 1)$ ; por ejemplo para  $\mu = 2$  el número de píxeles sería de 25. La apertura y cerradura morfológicas se definen de la forma siguiente:

$$\begin{aligned}\gamma_{\mu B}(f)(x) &= \delta_{\mu B}(\varepsilon_{\mu B}(f))(x) \\ \phi_{\mu B}(f)(x) &= \varepsilon_{\mu B}(\delta_{\mu B}(f))(x)\end{aligned}\quad (1)$$

Donde:  $\varepsilon_{\mu B}(f)(x) = \min\{f(y) : y \in \mu B_x\}$  y  $\delta_{\mu B}(f)(x) = \max\{f(y) : y \in \mu B_x\}$  son la erosión y la dilatación morfológicas. ( $\min$  es el operador mínimo valor y  $\max$  es el máximo valor). Otra clase de filtros interesantes, llamados filtros por reconstrucción [23-24], se construyen a partir de las transformaciones geodésicas. En el caso binario la dilatación (erosión) geodésica de tamaño uno de un conjunto  $Y$  (marcador) al interior de un conjunto  $X$  [25]

se define como:  $\delta_X^1(Y) = \delta_B(Y) \cap X$  ( $\varepsilon_X^1(Y) = \varepsilon_B(Y) \cup X$ ), mientras que en el caso de imágenes numéricas se definen por:

$\delta_f^1(g) = \min\{\delta_B(g), f\}$  ( $\varepsilon_f^1(g) = \max\{\varepsilon_B(g), f\}$ ). La transformación por reconstrucción y su transformación dual de un marcador  $g$  al interior de  $f$  se obtienen iterando las dilataciones y erosiones geodésicas hasta la estabilidad:

$$R(f, g) = \underbrace{\delta_f^1 \cdots \delta_f^1}_{\text{hasta estabilidad}}(g) \text{ y} \quad (2)$$

$$R^*(f, g) = \underbrace{\varepsilon_f^1 \cdots \varepsilon_f^1}_{\text{hasta estabilidad}}(g)$$

En particular cuando el marcador  $g$  es igual a la erosión o a la dilatación de la función original se obtienen la apertura y cerradura por reconstrucción:

$$\begin{aligned}\gamma_{\mu B}(f) &= R(f, \varepsilon_{\mu B}(f)) \\ \phi_{\mu B}(f) &= R^*(f, \delta_{\mu B}(f))\end{aligned}\quad (3)$$

## RESULTADOS Y DISCUSION

### *Segmentación y Clasificación por Criterios de Circularidad*

El proceso de segmentación de nódulos se realiza en diferentes pasos. Inicialmente, y con el objetivo de evitar el uso de técnicas basadas en umbrales, la imagen original (ver Fig. 3(a)) es filtrada. Este filtrado es llevado a cabo mediante los filtros por reconstrucción. Sea  $f$  la imagen original, para todo punto “ $x$ ” de la imagen se obtiene una segunda imagen a partir de la suma  $g(x)=f(x)+c$ , donde  $c$  es una constante que en nuestro caso, después de haber realizado un estudio sobre la totalidad de la imágenes tiene un valor de 70. Posteriormente se realiza la reconstrucción de  $g$  en  $f$ , i.e.  $R^*(f, g)$ . La imagen en Fig. 3(b) ilustra el resultado obtenido. A partir de esta imagen filtrada se pueden obtener directamente los nódulos calculando los mínimos de la imagen como se muestra en la Fig. 3(c). Observe que los nódulos que tocan los bordes han sido eliminados. Una vez extraídos los nódulos, se procede a separar aquellos que se encuentran conectados. Para realizar esta etapa se utiliza la noción de función distancia la cual se define de la siguiente forma:

*Definición* (Función distancia). La función distancia de un conjunto  $X$ , es la transformación que asocia a cada elemento  $x \in X$ , su distancia al complemento de  $X$  ( $X^C$ ) denotado como  $d(x, X^C)$ .

$$d_X \left( \begin{array}{l} X \rightarrow Z^+ \\ x \rightarrow d(x, X^C) \end{array} \right)$$

Se determina entonces la función distancia, ilustrada en la Fig. 3(d) de la imagen binaria Fig. 3(c). La función distancia es filtrada por una apertura morfológica seguida de una cerradura, ambas de tamaño 1, para remover ruido de discretización. Enseguida se obtiene la inversa de la imagen y se calcula la transformación conocida como

línea divisoria de aguas LDA (watershed en inglés), que es una herramienta fuertemente usada para la segmentación de imágenes en morfología matemática. Se distingue por obtener contornos cerrados al segmentar imágenes [26][27]. Se ilustra en la Fig. 3(e). Los contornos de la LDA permiten separar algunos de los nódulos conectados en la imagen original como se muestra en la Fig. 3(f). En las Figs. 3(g) y (h) se ilustra una ampliación de una región de la imagen original y la segmentada.

Después de haber segmentado los nódulos se procede a clasificarlos. Para esto se utiliza el algoritmo de la bisectriz condicional (BC) [25], como método de discriminación para seleccionar cuales nódulos tomar en cuenta para el conteo y cuales no, dependiendo de su morfología. La BC está dada como:

$$S(X) = \bigcup \{S_i(X), i \in N\} = \bigcup \{ \mathcal{E}_i(X) \setminus \delta_{\nu}(\gamma_{B(\mathcal{E}_{i+1}(X))}) \}, i \in N \} \quad (3)$$

La variable  $v$  en el dilatado ( $\delta_v$ ) juega un papel primordial; cuando  $v=0$  obtenemos el esqueleto morfológico. La Fig. 4(b) ilustra un ejemplo del esqueleto morfológico obtenido de la imagen en Fig. 4(a). El esqueleto morfológico se ilustra en color negro (puntos negros) sobre-puestos en la imagen original. Para un valor del parámetro  $v > 0$  se obtiene el resultado de la Fig. 4(c). Observe que la BC del círculo esta compuesto de una sola región en color negro, mientras que la otra componente que no es similar a un círculo tiene varias componentes (en color negro). De esta forma, la BC permite obtener el esqueleto de cada uno de los nódulos de grafito que hay en la metalografía, los nódulos más cercanos a un círculo tendrán un esqueleto formado por una componente conexas. Aquellos nódulos que su esqueleto sea un conjunto formado por varias componentes conexas no se toma como nódulo para el conteo. El criterio para seleccionar un nódulo se basa en el estándar ISO 945, considerando la clase VI como nódulos. La bisectriz condicional (BC) es de gran ayuda ya que para las clasificaciones de I a V obtendremos BC con varias componentes conexas. Mientras que los nódulos de clase VI tendrán una componente conexas. La imagen en la Fig. 5(a) ilustra los nódulos en gris oscuro mientras que la bisectriz condicional BC se muestra en blanco (ver zona ampliada en la Fig. 5(b)). Todos los nódulos que tienen una sola componente conexas del la BC son extraídos como se muestra en la Fig. 5(c). En la Fig. 6 se muestra otros ejemplos de segmentación y clasificación de nódulos. Una vez clasificados los nódulos se puede obtener la distribución granulométrica de los nódulos. Esta medición ha sido realizada en trabajos anteriores [27] y no forma parte de este estudio.

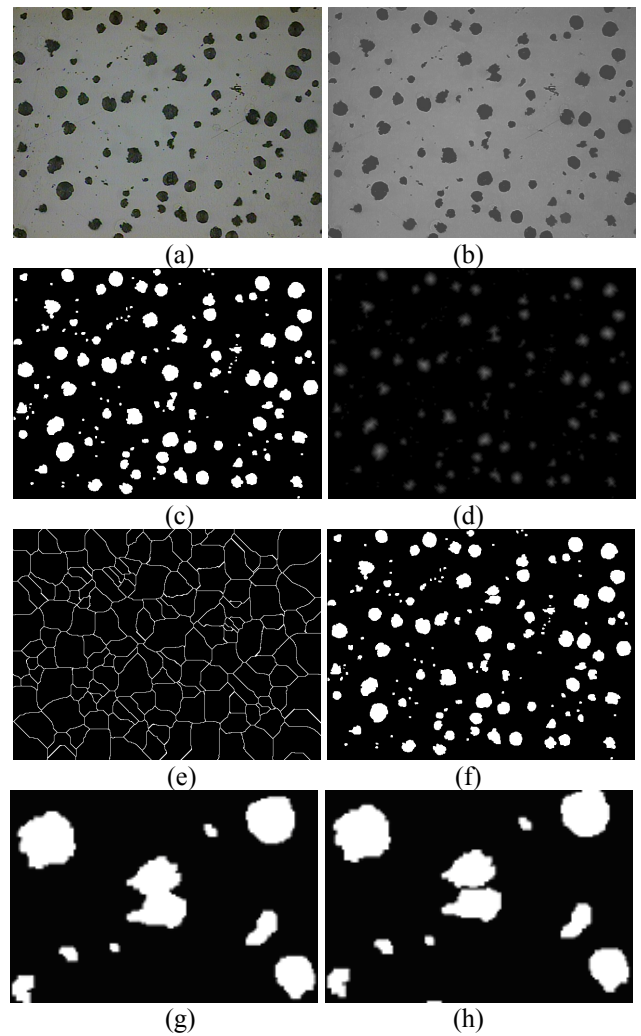


Fig 3. Secuencia de segmentación y clasificación de la circularidad

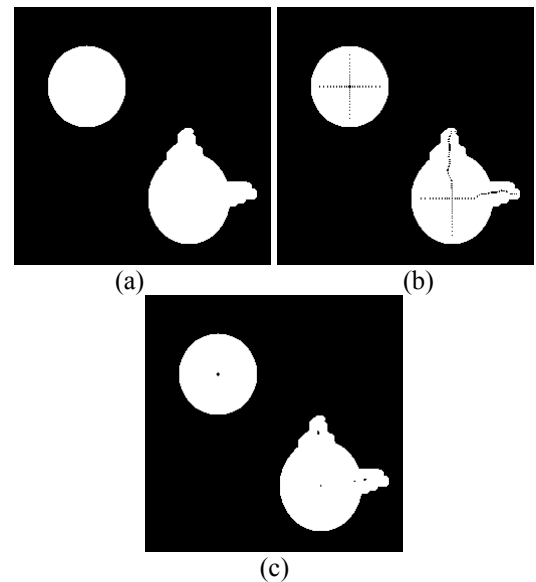


Fig. 4 Esqueleto morfológico y bisectriz condicional

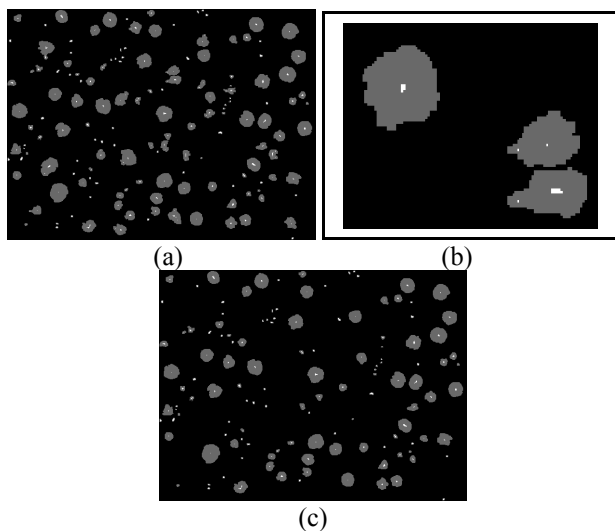


Fig 5. Clasificación de los nódulos

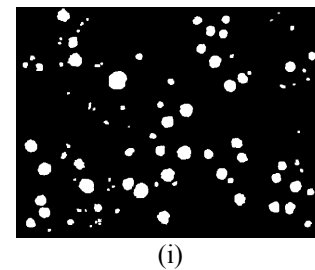
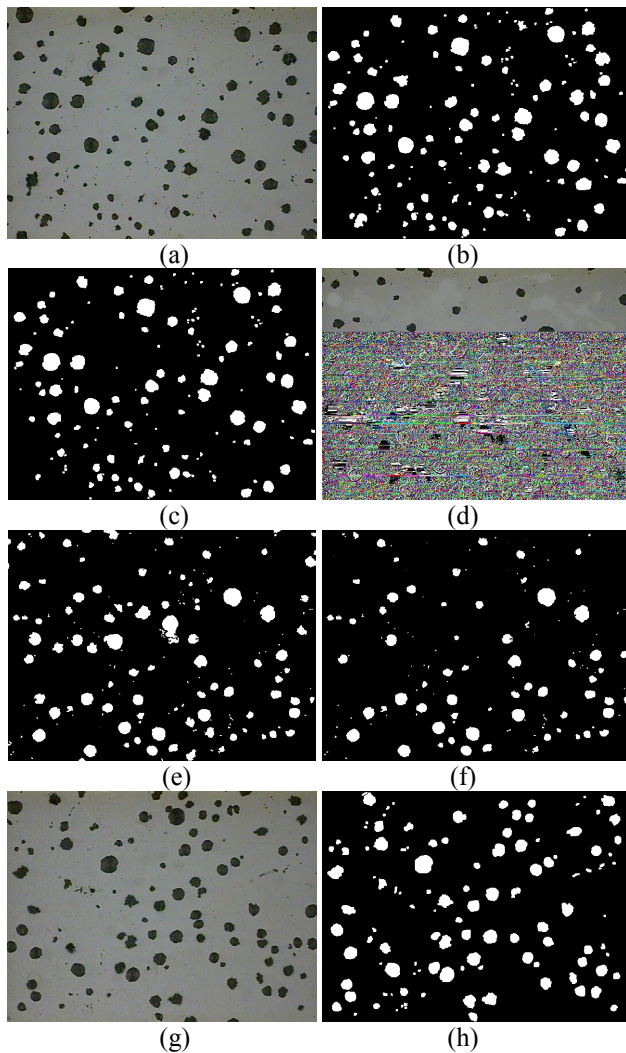


Fig. 6 Segmentación y clasificación de la circularidad; (a), (d) y (g) Imágenes originales, (b), (e) y (h) Imágenes segmentadas, (c), (f) e (i) Clasificación de nódulos

### Compacidad de la Matriz

El concepto de compacidad esta relacionado con la uniformidad de la distribución espacial de los nódulos. Este término está ligado con las distancias entre los nódulos. La morfología matemática provee de diferentes herramientas para determinar las distancias entre objetos (dilatados, erosionados, función distancia, etc.). En nuestro caso preferimos realizar un estudio granulométrico sobre la matriz usando aperturas morfológicas con el fin de determinar la distribución espacial de los nódulos. La noción de granulometría fue introducida por Serra [25] y se define de la manera siguiente.

**Definición Granulometría.** Una familia de aperturas  $\{\gamma_\lambda\}$  con  $\lambda \in \{1, \dots, n\}$ , es una granulometría si para todo  $\lambda, \mu \in \{1, \dots, n\}$  y toda función  $f$ ,  $\lambda \leq \mu \Rightarrow \gamma_\lambda(f) \geq \gamma_\mu(f)$ .

En la Fig. 7 se muestra el efecto de aplicar aperturas de diferentes tamaños (en este caso sobre la matriz del material). Observe en particular en la Fig. 7(d) que las estructuras que permanecen en la imagen corresponden a los tamaños más grandes de la estructura (matriz), las cuales realmente representan las distancias más grandes entre nódulos, contenidos en la matriz. En la práctica, para determinar las granulometrías (distribuciones de tamaños), se determina el residuo entre dos aperturas de tamaños diferentes  $([\gamma_{\mu_1}(f) - \gamma_{\mu_2}(f)])$ . Las imágenes en la Fig. 7(e)

muestra el residuo entre las aperturas tamaños 10 y 20 (Figs. 7(a) y (b)), mientras que la imagen en Fig. 7(f) el residuo entre las aperturas de tamaño 20 y 30 (Figs. 7(b) y (c)) es ilustrado. De esta manera, se dice que  $[\gamma_{\mu_1}(f) - \gamma_{\mu_2}(f)]$  contiene tamaños más grandes que  $\mu_1$ , pero más pequeños que  $\mu_2$ . Relacionando el tamaño con la distancia entre nódulos, diremos que la imagen en Fig. 7(e) contiene zonas con una distancia uniforme equivalente a los tamaños de aperturas 10 y 20, de la misma forma la imagen en la Fig. 7(f) contiene zonas con distancia uniforme equivalente a los tamaños de aperturas 20 y 30 (de mayor distancia a la de la imagen en Fig. 7(e)).

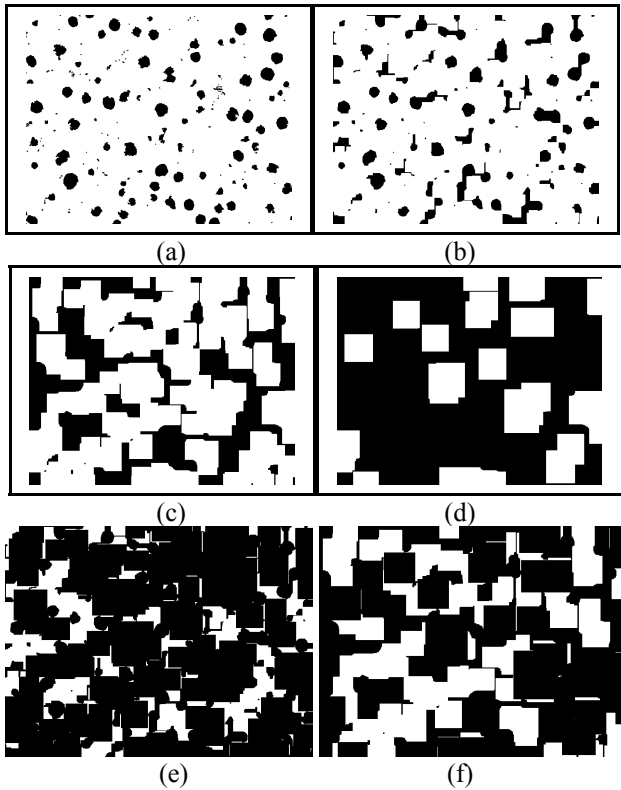


Fig. 7 a) Imagen complemento de los nódulos (matriz), b), c), d) Aperturas morfológicas con tamaños 10, 20 30, respectivamente, e) Residuo entre las aperturas tamaño 10 y 20, f) Residuo entre las aperturas tamaño 20 y 30

La distribución de tamaños (granulometría) calculada sobre la matriz permite determinar la compacidad de los nódulos sobre la matriz. En la Fig. 8, se muestran 4 curvas granulométricas correspondientes a arreglos diferentes de

nódulos (Fig 3(a), Fig 6(a), Fig 6(d), Fig 6(g)), y sus aproximaciones polinomiales de orden dos (parábola). Tres de las cuatro granulometrías tienen un comportamiento parabólico. Cuando la tendencia de la distribución de tamaños se aproxima a una parábola nos indica una distribución espacial uniforme de los nódulos (buena compacidad), mientras que un comportamiento diferente representa una mala distribución espacial de los nódulos (baja compacidad). Esto se muestra en la curva de aproximación parabólica para la imagen 3 (Fig. 6(d)) que no presenta un comportamiento parabólico(ver Fig. 8); esto se debe a que esta metalografía presenta una mala distribución espacial que se observa entre la mitad superior de la imagen y la mitad inferior de la misma (existe una mayor cantidad de nódulos en la mitad inferior). Todo lo contrario a las imágenes 1 y 2 correspondientes a las metalografías de la Fig 3(a) y Fig 6(a) respectivamente, presentan el comportamiento parabólico indicando la buena compacidad de estas muestras. Finalmente observe que la imagen de la Fig. 6(g) (curva de la imagen 4 en la gráfica) es menos uniformemente espacial como se ilustra en la curva parabólica (en color púrpura) que corta el eje de los tamaños en un punto mas alejado que las curvas imagen 1 e imagen 2. Se puede notar que al final de la distribución granulométrica (color púrpura) existe un porcentaje importante de estructuras de tamaño 50 que indica una menor compacidad de esta imagen con respecto a las imagen 1 e imagen 2. Esto se puede observar en la Fig. 9 donde se ilustran las curvas granulométricas de las imágenes de las Fig 3(a)(imagen 1) y Fig. 6(g)(imagen 2). La distribución de tamaños de matriz de la imagen de la Fig 6(g) tiene una mayor dispersión que la de la imagen de la Fig 3(a). Esta mayor dispersión en la granulometría se refleja en una mayor dispersión en las distancias entre nódulos. Sin embargo la compacidad de la imagen 4 es mejor que la compacidad de la imagen 3. Observe la dispersión granulométrica de la imagen 3 cuando se compara con la de la imagen 1 en la figura 10.



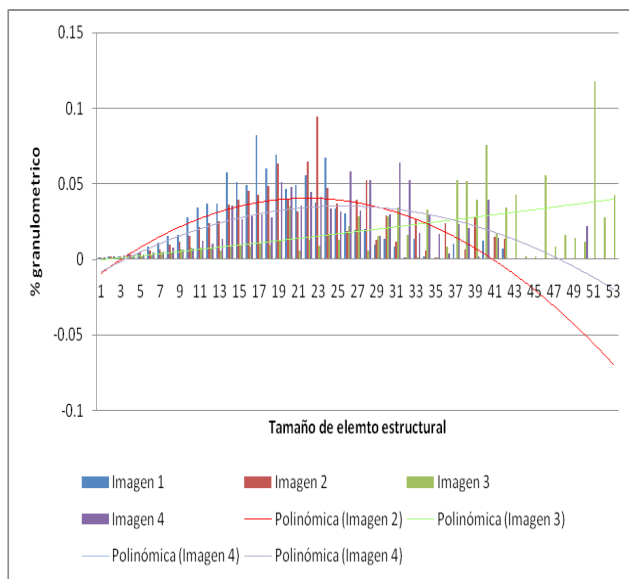


Fig. 8 Distribuciones de tamaños (granulometrías)

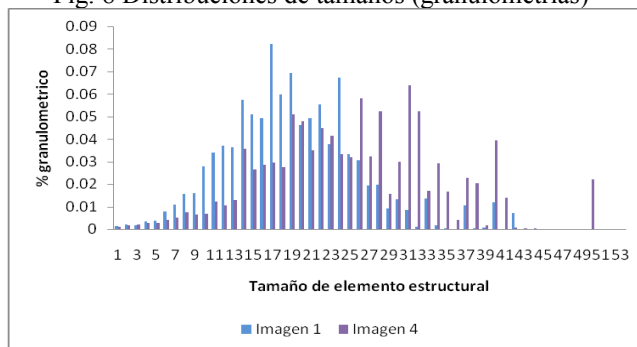


Fig. 9 Distribuciones de tamaños de las imagen Fig 3(a) y 6(g).

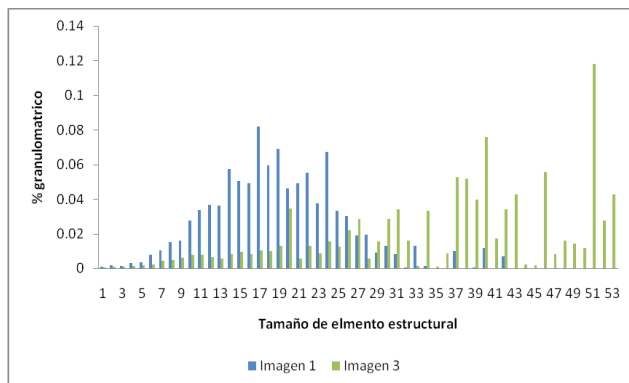


Fig. 10 Distribuciones de tamaños de las imágenes Fig 3(a) y 6(d).

## CONCLUSIONES

En el presente trabajo se propone y desarrolla una técnica de caracterización de nódulos basada en la morfología matemática. Después de segmentar los nódulos, se establecen los criterios de circularidad y compacidad. Resulta interesante la forma en que se determinan ambos

criterios, dado que está basada en transformaciones morfológicas básicas como son la apertura, la erosión y la dilatación. En el caso de la circularidad, esta se determina en función del número de componentes conexas de la bisectriz condicional, lo cual no requiere estrictamente hablando de una medida. Similar en el caso de la compacidad, determinada a partir de una granulometría, ya que esta depende de la tendencia de la distribución de tamaños en la matriz. Si el comportamiento de la distribución de tamaños es asimilable a una parábola se considera una buena compacidad.

La importancia del presente estudio resulta fundamental para determinar la calidad de una fundición nodular. El simple uso del criterio de circularidad permite fijar rangos más cuantitativos para la forma de los nódulos que está íntimamente ligada a la distribución de esfuerzos. Ahora bien, el criterio de compacidad (poco explorado) nos da un conocimiento más amplio en el mismo sentido de la distribución de esfuerzos, permitiendo entender más a profundidad las propiedades mecánicas de las fundiciones.

## REFERENCIAS

- [1] Georgiev M.N., Kosarev L.N., Mezkhova N.Y., Popova L.V. (1974) "Effect of grain size on the resistance of steel to crack propagation", *Metal Science and Heat Treatment*, 16:142-143
- [2] Hornbogen E., Staniek G. (1974) "Grain-size dependence of the mechanical properties of an age-hardening Fe-1 % Cu-alloy", *Journal of Materials Science*, 9:879-886
- [3] G.F. Vander Voort, *Metallography: Principles and Applications*. New York: McGraw Hill, 1984.
- [4] Maropoulos S., Ridley N., Karagiannis S. (2004) "Structural variations in heat treated low alloy steel forgings", *Materials Science and Engineering A*, 380:79-92



- [5] Ursin V., Trapeznikov D., Kochetov D., Anufriev P. (1971) "Concentration of thermal and mechanical stresses in graphites", *Strength of Materials*, 3:948-950
- [6] Golovin S., Kuzmenko V., Petrushin G., Pis'mennyi N., Renne I. (1980) "Damping capacity of cast iron with different shapes of graphite inclusions", *Strength of Materials*, 12:360-363
- [7] She S., Landes J. (1993), "Statistical analysis of fracture in graphite", *International Journal of Fracture*, 63:189-200
- [8] Andreiko I. (2003) "Specific Features of the Fatigue Fracture of Graphite Inclusions in Cast Irons and Steels", *Materials Science*, 39:129-131
- [9] Hecht R., Dinwiddie R., Wang H. (1999) "The effect of graphite flake morphology on the thermal diffusivity of gray cast irons used for automotive brake discs", *Journal of Materials Science*, 34:4775-4781
- [10] Guesser W., Schroeder T., Dawson S. (2001) "Production experience with compacted graphite iron automotive components", *AFS Transactions*, 01-071:1-11
- [11] Dawson S., Troschel W. (2001) "Process control for the production of CGI", *AFS Transactions*, 175:18-22
- [12] Samuelsson P., Vomacka P. (2003) "Compacted graphite iron for high performance piston rings", *Shipping World & Shipbuilder*, 1:34-35
- [13] Dawson S., Schroeder T. (2004) "Practical applications for compacted graphite iron", *AFS Transactions*, 2004. 04-047-1-9
- [14] Shakhnazarov T., Takhtarova J., (2006) "Dissipative processes during cyclic hardening of spheroidal graphite cast iron", *Russian Metallurgy (Metally)*, 4:323-328
- [15] Krasovskii Y., Rudenko V., Litovka V., Kalaida V. (2005) "Influence of microstructure and manganese content on the mechanical properties of cast irons with spheroidal graphite", *Strength of Materials*, 16:1001-1005
- [16] ASTM A 247, ASTM International, pp,1-2, Nov. 2006
- [17] AFS 5-J, *Cast Iron, Quality Control*, American Foundry Society, American Foundry Society", Committee, 2000.
- [18] JIS Handbook, *Ferrous Materials & Metallurgy I* Japanese Standards Association, 1996.
- [19] SAE Standard, *Automotive Ductile (Nodular) Iron castings*, SAE International, 1999.
- [20] Baron O.D., Lucas G. M. (2005) "Ductile Iron Nodularity Assessment: A Comparison Between Various Manual Procedures and Image Analysis", *Microscopy and Microanalysis*, 11:691-692
- [21] J. Serra, *Image Analysis and Mathematical Morphology*, Vol. 2, Academic Press, New York", 1988.
- [22] P. Soille, *Morphological image analysis*, 2nd edition, Springer-Verlag, Heidelberg, 2003.
- [23] Vincent L. (1993) "Morphological Grayscale Reconstruction in Image Analysis: Applications and Efficient Algorithms", *IEEE Transactions on Image Processing*, 2:176-201
- [24] Serra J., Vincent L. (1992) "An overview of morphological filtering", *Circuits, Systems and signal Processing*, 11:47-108
- [25] J. Serra, *Image Analysis and Mathematical Morphology*, Vol. 1, Academic Press, New York, 1982.
- [26] Hugues T., Terol-Villalobos I. R., (1992), Proc SPIE Boston, Binary image segmentation using weighted

skeletons, *Image Algebra and Morphological Image Processing*, 1769:393-404.

- [27] Manriquez-Guerrero F., Terol-Villalobos I. R., (2004), “Caracterización de HIPS mediante técnicas de análisis de imágenes”, *Revista Mexicana de Física*, 50:72-74.