

Análisis de las relaciones entre los parámetros de esfericidad, compacidad y el parámetro GAP en fundición nodular mediante micro-tomografía computarizada de rayos X y procesamiento de imágenes

Analysis of the relationships between the parameters of sphericity, compactness and the GAP parameter in nodular cast iron using X-ray micro-computed tomography and image processing

Martin Felcaro, Juan Toledo.

Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Rafaela

martinfelcaro8@gmail.com, juantoledojn12@gmail.com

Resumen

Este trabajo es una continuidad de una investigación previa (Toledo, 2021). El presente escrito se centra en el análisis más detallado de los parámetros de esfericidad y compacidad y también del parámetro GAP, relacionando estos con el tamaño de los nódulos de grafito esferoidal. Los datos fueron obtenidos a partir de una micro-tomografía computarizada de rayos-X realizada a una muestra de grado SGI 60-40-18 completamente ferrítico para así generar imágenes en 3D de alta resolución para el posterior análisis de las mismas. En base a una nueva subpoblación se establece la correlación entre los primeros dos parámetros, y en base a tres subpoblaciones definidas anteriormente según el tamaño de los nódulos, se analiza cómo evoluciona el parámetro GAP. Los resultados reafirman el uso combinado de los parámetros de esfericidad y compacidad, y agregan el uso del parámetro GAP como medio para determinar la calidad de los nódulos, al mismo tiempo que evidencian una tendencia a la agrupación de estos.

Palabras claves Tomografía de rayos-X, Fundición nodular, Esfericidad, Compacidad, Parámetro GAP

Abstract

This paper is an extension of previous investigation (Toledo, 2021). The present article is focused in the most detailed analysis of sphericity, compactness, and the GAP parameter, linking them with the spheroidal graphite nodules size. Data was obtained from an X-ray micro-computed tomography of a fully ferritic grade SGI 60-40-18 sample in order to generate 3D high-resolution images for their subsequent analysis. Based in a new subpopulation, a correlation is established between the first two parameters mentioned, and based on three previously defined subpopulation by the nodules size, it is analyzed how the GAP parameter evolves. The results reaffirm the combined use of sphericity and compactness parameters and add the use of the GAP parameter to determine the nodules quality, at the same time, they show a trend to clustering.

Keywords X-ray tomography, Nodular Cast Iron, Sphericity, Compactness, GAP parameter

1. Introducción

Existe gran variedad de fundiciones de hierro diferentes, un tipo de ellas es la fundición nodular o fundición de grafito esferoidal o fundición de hierro dúctil; recibe estos nombres debido a la morfología con nódulos de grafito que presenta, asemejándose a esferas dispersas aleatoriamente en la matriz metálica. Esta distribución de grafito es la que hace que posea muy buenas propiedades mecánicas en cuanto a ductilidad y resistencia al desgaste diferenciándola de las demás fundiciones de hierro que se caracterizan por ser extremadamente duras y frágiles. Estas buenas propiedades hicieron que reemplazara al acero en terminadas aplicaciones. En la actualidad hay muchos softwares que se basan en la tomografía y micro-tomografía computarizada para poder obtener imágenes en 2D y 3D que permiten determinar el volumen total de la pieza, y además diferentes parámetros: nodularidad, esfericidad (SG), compacidad (C) y GAP (que se analizan en este trabajo), como así también el volumen total de nódulos y el volumen total de cada material.

Los parámetros de esfericidad y compacidad son muy importantes para la determinación de las propiedades mecánicas y poder caracterizar los nódulos de grafito. El vínculo entre estos parámetros fue examinado detalladamente en el trabajo (Díaz et al., 2021) con el fin de establecer categorías de calidad para los nódulos de grafito en una muestra de fundición nodular completamente ferrítica. En dicho trabajo, la compacidad se identifica como el mejor parámetro geométrico para clasificar adecuadamente la calidad de los nódulos de grafito ya que, para los mismos nódulos analizados, los valores de compacidad son más diversos, lo que permite una mayor diferenciación de los mismos y mayor precisión final. También se determinó un valor límite de esfericidad para los nódulos que permitió agruparlos en una subpoblación final (ST) que contiene únicamente nódulos con valores superiores de SG 65% y de C 50% (los nódulos pertenecientes en este rango son de alta calidad).

En este trabajo, como continuación del trabajo (Toledo, 2021), se profundiza la relación entre los parámetros de esfericidad y compacidad de los nódulos de grafito pertenecientes a una subpoblación de concentración derivada de la subpoblación final de nódulos de alta calidad mencionada. También se analizan las distribuciones de esfericidad y compacidad vinculadas al tamaño de los nódulos de grafito y la tendencia al agrupamiento de dichos nódulos, lo cual incide en el parámetro GAP, que constituye una variable para evaluar la calidad de dichos nódulos.

2. Materiales y métodos

El material utilizado en el estudio es una fundición de grafito esferoidal embebida en una matriz totalmente ferrítica, la cual se logra realizando un tratamiento de austenización a la pieza que consiste en calentarla hasta alcanzar una temperatura de 920 °C durante una hora y luego dejar que enfríe lentamente dentro del horno hasta llegar a temperatura ambiente. Este proceso se lleva a cabo ya que la formación de ferrita ayuda a la creación de nódulos y además, para evitar la formación de perlita en la matriz, la cual es perjudicial para las propiedades de la fundición nodular ya que posee grafito laminar en su microestructura particular. El material utilizado corresponde a uno de grado 60-40-18 según ASTM.

La tomografía se obtuvo en un sistema Phoenix V |tome| x S 240 (General Electric), escaneando una muestra de SGI de 6,4 mm × 5,1 mm × 1,2 mm. Además, se utilizó un filtro de Cu de 0,1 mm para aliviar los artefactos producidos, se realizó una reducción del ruido aumentando el voltaje de aceleración (80 kV) y se mejoró el contraste aumentando la corriente del filamento (90 μA) logrando de esta manera aumentar la relación contraste-ruido (CNR) de la imagen. A su vez, para evaluar la calidad de la tomografía se consideró el CNR, la resolución y la incertidumbre

experimental. El valor de CNR se calculó a partir de 20 mediciones experimentales en diferentes secciones transversales de la imagen tomográfica y obteniendo como resultado un valor de aproximadamente 10,45. Por otro lado, los parámetros de resolución utilizados fueron $\sim 7 \mu\text{m}$ / vóxel con 800 proyecciones, 3 fotogramas promediados por cada proyección, y un tiempo de escaneo de aproximadamente 1 h. Por último, la calibración dimensional se realizó mediante 30 mediciones tomográficas en 3 patrones de calibración (hilos de acero) con diámetros nominales de $175 \mu\text{m}$, $195 \mu\text{m}$ y $250 \mu\text{m}$, dando como resultado una incertidumbre expandida (U) de $\pm 5,8 \mu\text{m}$ (Toledo, 2021).

Una vez realizado todo el proceso de tomografiado, reconstrucción y generación del modelo se procedió a establecer una región de interés (ROI) a partir de la cual es posible obtener la morfología y distribución de los nódulos. La misma es una región más acotada utilizada para realizar el estudio de una manera más rápida y simplificada pero igualmente representativo. Las dimensiones de la ROI son $2,6 \text{ mm} \times 2,1 \text{ mm} \times 0,5 \text{ mm}$ y contiene 9238 nódulos. Cabe destacar que dentro de la mencionada ROI solo se consideraron nódulos de un diámetro mayor a $25 \mu\text{m}$.

En este trabajo el análisis se basa en 4 parámetros característicos como ser el diámetro del nódulo, su esfericidad, su compacidad y su GAP. La esfericidad se puede definir en función del volumen del nódulo (V) y la superficie de este (A) mediante la ec. (1) (Bjerre et al., 2018)

$$S_G = (36 \pi V^2)^{1/3} A^{-1} \quad (1)$$

La compacidad se define como la relación entre V y el volumen de la esfera circunscrita en dicho nódulo (V_s), como se presenta en ec. (2)

$$C = V/V_s \quad (2)$$

A su vez, si consideramos el tamaño de los nódulos en función del diámetro de estos, es posible obtener tres subpoblaciones que relacionen los parámetros descriptos hasta el momento y por lo tanto se consideraron únicamente los nódulos pertenecientes a la “subpoblación final” compuesta de nódulos de alta calidad definida en el trabajo (Díaz et al., 2021). Estas subpoblaciones se presentan en la Tabla 1 a continuación.

Por su parte, el parámetro GAP representa la distancia entre un nódulo y su vecino más cercano, medida esta desde las esferas circunscritas de cada nódulo, como se aprecia en la Figura 1.

Subpoblación	Diámetro (μm)	Esfericidad	Compacidad	Conteo nódulos
S1	25-40	0.65-1.0	0.50-1.0	724
S2	40-60	0.65-1.0	0.50-1.0	852
S3	60-80	0.65-1.0	0.50-1.0	334

Tabla 1. Parámetros utilizados para delimitar cada subpoblación.

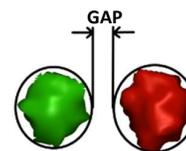


Figura 1. Parámetro GAP.

3. Resultados

3.1. Complementariedad entre SG y C en la zona de concentración

Profundizando los resultados obtenidos en el trabajo (Toledo, 2021), en la Tabla 2 se puede apreciar la cantidad de nódulos que hay para cada combinación en particular de valores de C y SG, dentro del rango de concentración establecido de nódulos de diámetro $30 \leq \emptyset \leq 70$.

En este caso se observa una concentración de nódulos para los rangos de valores 66-67% de SG y 52-59% de C. Se puede deducir que las correlaciones son más fuertes en valores bajos y medios tanto de esfericidad como de compacidad. Asimismo, reafirmando lo planteado en el trabajo

predecesor, la zona de concentración de nódulos comprende únicamente 2 valores de esfericidad, pero 8 valores de compacidad, evidenciando la necesidad de utilizarlos en forma combinada para correlacionarlos con la calidad de la forma del nódulo y que, además, los valores de C al ser más variables permiten una mayor diferenciación y más detallada caracterización.

		SG					
		0,65	0,66	0,67	0,68	0,69	0,7
C	0,5	12	13	17	13	17	12
	0,51	26	34	23	23	12	7
	0,52	13	31	29	26	12	11
	0,53	9	32	26	23	14	13
	0,54	11	37	25	27	12	9
	0,55	15	33	23	21	12	17
	0,56	19	32	33	22	15	9
	0,57	8	35	28	21	16	9
	0,58	18	34	26	20	9	7
	0,59	15	25	27	22	11	3
	0,6	4	23	21	17	8	5
	0,61	6	20	14	13	6	5
	0,62	2	19	16	12	9	1
	0,63	2	15	16	10	10	3
Conteo total		160	383	324	270	163	111

Tabla 2. Relación entre parámetros de C y SG para nódulos pertenecientes a la zona de concentración.

3.2. Parámetro GAP y la zona de concentración

El parámetro GAP representa la distancia al vecino más cercano (medida en micrones). En este caso, podemos decir que existen 141 nódulos con valores de GAP negativos en la ST, lo cual es un número bajo para una subpoblación constituida por 1910 nódulos, lo que indica una buena calidad de los nódulos teniendo en cuenta que estos valores corresponden a nódulos muy cercanos y que, a su vez, son los más alejados de la forma esférica ideal. Asimismo, si analizamos estos valores para cada subpoblación, podemos decir que S1 presenta la menor cantidad de nódulos con valores de GAP negativos (18 nódulos) seguido de S3 (38 nódulos) y S2 (85 nódulos) con lo cual pareciera no existir relación entre los parámetros de GAP y el tamaño de los nódulos. Sin embargo, si se tienen en cuenta la cantidad de nódulos para cada subpoblación:

- S1: 724 nódulos - 18 nódulos con valor de GAP negativo: 2,4% de nódulos
- S2: 852 nódulos - 85 nódulos con valor de GAP negativo: 9,9% de nódulos
- S3: 334 nódulos - 38 nódulos con valor de GAP negativo: 11,3% de nódulos

se observa que el porcentaje de nódulos negativos va aumentando conforme nos desplazamos desde S1 a S3, afirmando que, si existe una relación entre los parámetros antes mencionados, destacándose la gran calidad de los nódulos de pequeño tamaño.

La Fig. 2 representa un histograma que vincula los valores de GAP con su correspondiente conteo, en naranja para la subpoblación final y en azul para la zona de concentración. Vale aclarar que la diferencia entre la frecuencia se debe a un resultado lógico por la cantidad de nódulos que posee cada grupo. En cuanto a los valores GAP positivos, es posible evidenciar una asimetría a derecha, indicando una gran cantidad de nódulos cuyas distancias a sus vecinos más cercanos es relativamente corta. A su vez, a medida que los valores de GAP crecen, el conteo de nódulos disminuye, lo cual demuestra una tendencia al agrupamiento de nódulos pequeños.

Si nos enfocamos en el tamaño de los nódulos podemos decir que existen 273 nódulos cuyo diámetro es inferior a 30 μm y 46 nódulos con diámetro superior a 70 μm . Esto posibilita deducir

que la gran diferencia en nódulos con bajos valores de GAP se debe principalmente a la gran cantidad de nódulos con diámetro inferior a 30 μm , teniendo en cuenta que cuando la distancia al vecino más cercano es corta, el crecimiento de los nódulos se ve limitado debido a que se genera una competencia por el carbono con el nódulo de grafito vecino.



Figura 2. Gráfico combinado de histogramas de la subpoblación final y la zona de concentración.

4. Conclusiones

En primer lugar, a partir del análisis realizado en la Tabla 2 se verifica que, aun trabajando en una determinada concentración de la subpoblación final con mayor grado de detalle, se mantiene que los valores de compacidad son más diversos que los de esfericidad y además se evidencian mayores correlaciones para valores bajos y medios. Posteriormente, al analizar los valores negativos obtenidos de GAP en función de los tres rangos de la subpoblación final establecemos que a medida que aumenta el tamaño de los nódulos también lo hace el porcentaje de resultados negativos. Luego al analizar esto en los histogramas de la Figura 2 se aprecia una gran cantidad de valores pequeños de GAP, dentro de los positivos, lo que evidencia un agrupamiento de nódulos pequeños. Al considerar esto en conjunto se puede establecer que los nódulos pequeños son de gran calidad ya que al encontrarse agrupados muy próximos entre sí, si no fueran de esta índole sus valores de GAP serían negativos. Estos resultados permiten reafirmar el uso combinado de los parámetros de esfericidad y compacidad para la caracterización geométrica de los nódulos de grafito debido a su complementariedad y diferente precisión de cada parámetro y además añadir el GAP proporciona un nuevo elemento para mejorar la evaluación de la morfología de dichos nódulos y su distribución en la matriz metálica.

5. Referencias

Bjerre, M., Azeem, M.A., Lee, P., Hattel, J.H. & Tiedje, N. (2018). "Revisiting Models for Spheroidal Graphite Growth", *Materials Science Forum*, 925, 118-124.

Carazo, F.D., Dardati, P.M., Celentano, D.J. & Godoy, L.A. (2012) "Modelado de las transformaciones difusionales de la austenita durante el enfriamiento continuo de una fundición nodular", *Mecánica Computacional*, 31, 1909-1936.

Díaz, F.V., Peralta, M.E. & Fernandino, D.O. (2021). "Study of Sphericity and Compactness Parameters in Spheroidal Graphite Iron Using X-Ray Micro-computed Tomography and Image Processing", *Journal of Nondestructive Evaluation*, 40, (11), 1-10.

Gebhardt, C., Chen, G., Bezold, A. & Broeckmann, C. (2018) "Influence of graphite morphology on static and cyclic strength of ferritic nodular cast iron", *Institute for Materials Applications in Mechanical Engineering*, 165, 1-8.

Toledo, J.C. (2021) "Análisis de las relaciones entre los parámetros de esfericidad y compacidad en fundición de grafito esferoidal mediante microtomografía computarizada de rayos X y procesamiento de imágenes", *JIT*, 1-5.