

Influencia del vertido vibratorio en la resistencia a la tracción del hierro con grafito esferoidal

Rigoberto P. Sánchez-Figueroa
Asdrúbal B. García-Domínguez
Roberto Pérez-Rodríguez
Isnel Rodríguez-González

Resumen

En la industria de la construcción de maquinaria se observa como tendencia la sustitución del acero por el hierro con grafito esferoidal en la fabricación de piezas, debido a que este último posee mejores propiedades mecánicas y menor costo de producción. Este artículo tiene como objetivo mostrar la influencia del vertido vibratorio en la resistencia a la tracción del hierro gris con grafito esferoidal, a través del método experimental. Se corroboró que al utilizar el vertido vibratorio a 70 Hz, a una temperatura de vertido de 1 450 °C, se obtiene una mejor estructura homogénea de grafito nodulizado con una matriz ferrito-perlítica, para de esta forma proporcionar los mejores resultados estructurales y una adecuada resistencia a la tracción.

Palabras clave: hierro gris; grafito esferoidal; vertido vibratorio; máxima resistencia; grafito nodulizado.

Influence of the vibratory ischarge on the resistance of the iron with spheroidal graphite to traction

Abstract

It is observed as common practice steel being replaced with iron with spheroidal graphite for the manufacture of parts in the machinery construction industry. This is owed to the fact that the latter has better mechanical properties and a low production cost. The objective of this article is to show the influence of the vibratory discharge on the resistance of grey iron with spheroidal graphite to traction applying the experimental method. It was proved that implementing the vibratory discharge at 70 Hz, and a discharge temperature of 1450 oC results in graphite pelletized with an improved homogeneous structure with a ferrite-perlite matrix. Consequently, this provides better structural results and an adequate resistance to traction.

Keywords: grey iron; spheroidal graphite; vibratory discharge; maximum resistance; graphite pelletized.

1. INTRODUCCIÓN

El hierro gris fundido de alta resistencia con grafito esferoidal puede superar al acero en cuanto a sus propiedades de fundición, menor densidad y menor costo de producción. La forma redondeada del grafito nodular, en su microestructura, reduce la concentración de tensiones y, en consecuencia, el material es mucho más dúctil que el hierro gris. Suele utilizarse en piezas que soportan elevadas cargas (Zhang, Zhao & Zhu 2015). Por ese motivo, en el diseño e ingeniería es una tendencia la sustitución de piezas elaboradas de hierro fundido o de aceros, por hierro gris nodulizado de alta resistencia con grafito esferoidal. Este fenómeno se observa de manera más notable en la industria automovilística, la naval, la de materiales de la construcción y la construcción de maquinarias agrícolas.

Para obtener la estructura esferoidal es necesario modificar el caldo de hierro fundido a través de nodulizantes, que son aleaciones que contienen silicio y elementos como magnesio, cerio o calcio. Dichos elementos promueven la transformación del grafito laminar en esferoidal o vermicular, lo que mejora la resistencia mecánica, el alargamiento relativo, la resistencia del material, la colabilidad, entre otros. Los nodulizantes son elaborados con características similares en su composición (Ilarduya 2010; Alonso et al. 2014).

Este tipo de fundición se caracteriza porque el grafito aparece en forma de esferoides. La fundición nodular se diferencia de la fundición maleable en que normalmente se obtiene de la colada, directamente en bruto, sin necesidad de un tratamiento térmico posterior (Luffe 1995).

1.1. Métodos de modificación del hierro gris

Según Mingfang et al. (2015) existen diferentes métodos para modificar el hierro gris en el horno, en la cazuela y en el molde; algunos de ellos se basan en la introducción del magnesio en la cazuela de vertido. El procedimiento consiste en depositar en el fondo de la cuchara el nodulizante, que reacciona al ser vertido el caldo metálico. Otra técnica consiste en la inmersión de la aleación contenida en una campana de material refractario o de grafito.

Actualmente se utilizan tres técnicas diferentes para obtener un hierro nodulizado (Metzger & Seifert 2015). La primera consiste en depositar la aleación en el fondo o en un lado de la cuchara, luego se cubre con desperdicios de chapas de acero; dicha cuchara se va cubriendo con la fundición a medida que se llena la cuchara por el lado opuesto.

Otro método es el denominado "sándwich", en el que la aleación se deposita en una cavidad en el fondo de la cuchara y se tapa con chapas de acero, al ser llenada la cuchara por la parte superior del fondo, se va cubriendo la aleación con fundición líquida.

Un último método, y que está teniendo mucho auge en la actualidad, es el denominado "trigger", donde la aleación se deposita en una cavidad en el fondo de la cuchara, y esta se cubre con una capa de carburo de calcio, con granulometrías que van desde 0,3 mm a 0,7 mm. En este caso, al contacto de la fundición líquida el carburo se vitrifica y forma una corteza sólida; una vez llenada la cuchara, la corteza es perforada por un vástago de acero, iniciándose así una reacción moderada.

1.2. Método de la fundición con aleaciones pesadas

Las aleaciones pesadas, en base de níquel o de cobre, presentan la ventaja de un empleo más sencillo que las aleaciones de baja densidad, las mismas pueden depositarse en el fondo de la cuchara sin precauciones especiales o, incluso, verterse en la cuchara después de llenada. Estas aleaciones son empleadas en las fundiciones inglesas productoras de fundición nodular que utilizan aleación Ni-Mg (Sánchez-Figueroa 2007; Pina, Kouznetsova & Geers 2015).

1.3. Método de modificación en el molde

Este proceso (Davis 1999) consiste en establecer una cámara en el molde donde se coloca el nodulizante y se produce toda la reacción. Tiene grandes ventajas en cuanto a otros métodos de obtención del hierro con grafito esferoidal: economía del modificador (asimilación del magnesio entre 80 % y 90 %), simplificación del proceso productivo, disminución del piroefecto, aumento de las propiedades mecánicas, poca presencia o eliminación casi total de carburos libres en la estructura, lo que trae como consecuencia que se pueda prescindir del tratamiento térmico.

Es conocido que el efecto modificador disminuye principalmente entre los cinco a diez segundos después de introducido el nodulizante (Karsay 1992). Este tipo de producción por los métodos actuales presenta un alto índice de rechazo, al desmodificarse el caldo metálico, volviendo a su estructura laminar antes de solidificarse.

1.4. Uso del método de vertido vibratorio

El método de vertido vibratorio consiste en colocar los moldes sobre una plataforma vibratoria y realizar el vertido del caldo metálico, manteniendo el régimen vibratorio hasta la solidificación total de la pieza. Este régimen permite la eliminación de defectos e inclusiones no metálicas tales como escorias, poros y sopladuras en las piezas; así como propicia la formación de esferoides, debido a que al formarse los puntos de cristalización primarios las vibraciones desmenuzan esta fase y multiplican los puntos de cristalización e incrementan la velocidad de enfriamiento y solidificación del fundido a niveles superiores de la velocidad de desmodificación. Este proceso garantiza la obtención de una estructura esferoidal estable y proporciona un régimen homogéneo de modificación.

El presente artículo tiene como objetivo determinar la influencia que ejerce el vertido vibratorio en las características y estructura nodular del hierro con grafito esferoidal.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El proceso de experimentación se dividió en varias etapas que se describen seguidamente.

2.1. Frecuencia de vibraciones

Se realizó una valoración de los valores extremos de frecuencia con el objetivo de definir el régimen de vibración adecuado para obtener un hierro gris con una estructura homogénea de los nódulos de grafito. Para dicha experimentación se seleccionó 65 Hz como primera frecuencia de las vibraciones del molde, pues con esta frecuencia las sustancias de menor peso específico, presentes en el caldo metálico, como son escorias e inclusiones no metálicas ascienden a la superficie eliminando poros, sopladuras y otros defectos internos. Luego se definieron las frecuencias de 70 Hz y 75 Hz; se escogió el rango de 1 420 °C y 1 450 °C como temperatura de vertido. En la Tabla 1 se muestran los datos más adecuados para la experimentación.

Tabla 1. Frecuencia de vibraciones experimentadas

Temp. de vertido (°C)	Vertido Vibratorio (Hz)					
	65		70		75	
	Sin ataque	Con ataque	Sin ataque	Con ataque	Sin ataque	Con ataque
1 425	Microestruc	Microestruc	Microestruc	Microestruc	Microestruc	Microestruc
	Rm (MPa)	Rm (MPa)	Rm (MPa)	Rm (MPa)	Rm (MPa)	Rm (MPa)
1 450	A (%)	A (%)	A (%)	A (%)	A (%)	A (%)
	Ce	Ce	Ce	Ce	Ce	Ce

Los experimentos se realizaron bajo condiciones específicas y se cumplió con la instrucción tecnológica de fusión, en horno de cubilote de 700 mm de diámetro interior, con una composición de la carga de porcentaje: de retorno, de arrabio, de chatarra de hierro. El caldo metálico se trató con FeSi y FeMn.

El vertido se realizó con una temperatura de 1 450 °C en moldes de probetas "Y" de 25 x 75 x 175 mm, según la norma ASTM A537-84 (Reaprobada 1999), para la extracción de muestras en ensayos mecánicos. Las probetas se obtuvieron con modificación en cámara cilíndrica "in mold" con una composición de la mezcla de moldeo de: 5 % de bentonita, 2 % de miel final de la caña, 4 % de agua y el resto de arena sílice.

2.2. Relación entre la frecuencia de vibración y la resistencia

Para la determinación de la relación existente entre la frecuencia de vibración y la resistencia última a la tracción se desarrolló un diseño de experimento factorial completo tipo 3^2 . En el diseño experimental la composición química del metal base se mantuvo constante. Se calcularon el tiempo de vertido, la velocidad de vertido y cantidad de aleación nodulizante. Como variables independientes se fijaron la frecuencia de vibración, la amplitud de la vibración y la temperatura de vertido. La variable dependiente definida fue la tensión de rotura. En la Tabla 2 se muestran los valores definidos para cada variable analizada.

Tabla 2. Variables consideradas en los experimentos

Variable	Tipo de variable	Medida
Frecuencia de vibración	Independiente	65, 70 y 75 Hz
Amplitud de vibración	Independiente	3 mm
Temperatura de vertido	Independiente	1 425 °C – 1 450 °C
Masa de aleación nodulizante NODULAN II	Independiente	189,98; 170,99 y 151,99 g
Tamaño máximo de los nódulos	Dependiente	Diámetro de los nódulos de grafito (Mk)

Se incorporaron los tratamientos aplicados en el experimento, a una frecuencia de vibración (F), temperatura de vertido (Tv) y amplitud de vibración (Av), como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Tratamientos aplicados en el experimento

F_1 Tv, Av	F_2 Tv, Av	F_3 Tv, Av
--------------	--------------	--------------

La aplicación práctica del diseño de experimento se materializa cumpliendo la metodología que se explicará a continuación:

Se colocaron los moldes (Figura 1) sobre la rampa vibratoria, compuesta de chapas y vigas de acero de 1 200 x 2 000 mm, con un vibrador electromagnético ensamblado en el centro y cuatro resortes de 300 mm de altura, como soportes.

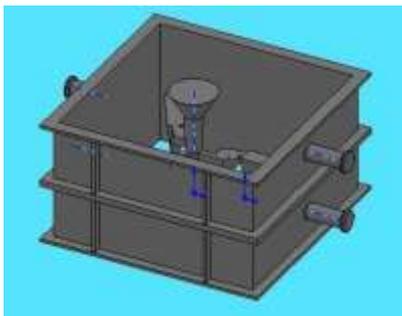


Figura 1. Molde colocado en la rampa vibratoria.

La masa (3,57 % de C y 2,55 % de Si), base de la aleación nodulizante (189,98 g), fue vertida en la cazuela a una temperatura entre los 1 470 °C y 1 490 °C, en la que se garantizó una temperatura de vertido de 1 450 °C a 1 425 °C; la velocidad de vertido fue de 2,42 kg/s. El sistema de alimentación se definió por el método OSSAN. Se eliminó la escoria superficial y se activó el vibrador electromagnético a la frecuencia indicada y a una amplitud de 3 mm. Durante el proceso de vertido se mantuvo el tratamiento vibratorio hasta el final de la solidificación.

Se procedió a realizar las actividades de desmoldeo, acabado y la preparación de las muestras para el análisis de la microestructura. Los parámetros tecnológicos que se determinaron para la aplicación del experimento se enumeran a continuación.

2.3. Preparación y ensayo de las muestras

Las muestras fueron preparadas y cortadas con longitud de 15 X 15, según la norma ASTM E-92, las que fueron sometidas a un proceso de desbaste con refrigerante para evitar variaciones en su microestructura; luego fueron pulidas, de manera progresiva, con lijas de granos desde 150 hasta 800. Fueron atacadas químicamente con una solución de Nital al 5 % y observadas, antes del ataque, en un microscopio metalográfico, con un aumento de 100X; después de atacadas los aumentos empleados fueron de 100X a 400X (norma UNE 36111-36118). Las imágenes se grabaron con el empleo de una cámara de vídeo Panasonic CCTV wv – CP 474, acoplada en el mencionado microscopio.

Se prepararon probetas para la determinación de las propiedades mecánicas, de acuerdo con la norma ASTM E 8M-93; dichos ensayos se realizaron en una máquina universal de tracción-compresión.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados experimentales muestran (Tabla 4) que el comportamiento de la variable dependiente (resistencia a la tracción), en función de la frecuencia de vibración, de la temperatura de vertido y de la masa de la aleación nodulizante, a una temperatura de 1 425 °C, se logran los mayores valores de resistencia (552,4 MPa).

Tabla 4. Resultados de los experimentos

Masa NODULAN II (g)	Temperatura de vertido (°C)	Vertido vibratorio (Hz)		
		65	70	75
		Rm (MPa)		
	1 450	407,9	395,3	329,8
189,98	1 425	505,5	473,6	552,4
	1 450	453,4	508,1	426,4
170,99	1 425	419,2	420,5	418,4
	1 450	503,7	387,6	445,2
151,99	1 425	436,9	398,7	397,6

La Figura 2 muestra la presencia de inclusiones de grafito nodular en la microestructura de una probeta obtenida a una temperatura de vertido de 1 450 °C y frecuencia de vibración de 65 Hz sin ataque químico. El área ocupada por el grafito en la estructura es mayor al 12 % y el diámetro máximo de las inclusiones de grafito oscila entre los 40 y 60 μm .



Figura 2. Muestra sin ataque químico (frecuencia de 65 Hz).

En la matriz de la microestructura revelada, con ataque químico (Figura 3), se observa una composición, mayoritariamente, de ferrita en forma de granos y perlita acicular. El área ocupada por la perlita en la microestructura se encuentra entre el 2 % y el 10 %, con una resistencia máxima a la tracción de 453,4 MPa y una elongación relativa del 10,4 %.

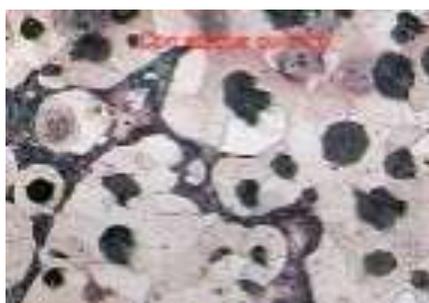


Figura 3. Muestra con ataque químico (frecuencia de 65 Hz).

Se observa que no hay presencia de inclusiones (Figura 4) y que el grafito nodular ocupa un área, en la estructura, que está por encima de 8 %, hasta 12 %, con dimensiones que van desde los 40 μm hasta los 60 μm .

Cuando la muestra se ataca químicamente (Figura 5) se evidencia una matriz compuesta por ferrita, en forma de granos, más perlita; el área ocupada por esta última, en la estructura, es superior al rango entre 20 % hasta 45 %, con una resistencia máxima a la tracción de 508,1 MPa y una elongación de 9,1 %.

Cuando no hay ataque químico se observan inclusiones de grafito nodular (Figura 6), con un área ocupada por el grafito en la estructura, de más de 12 % y dimensión de más de 40 μm hasta 60 μm de diámetro máximo.

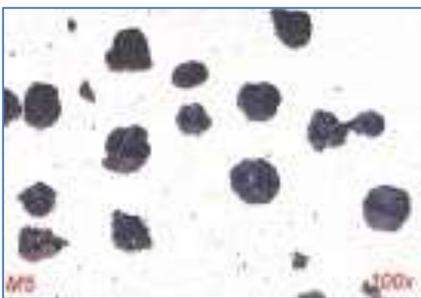


Figura 4. Muestra sin atacar



Figura 5. Muestra atacada

.Si se ataca químicamente (Figura 7) en la matriz habrá una microestructura compuesta por ferrita, en forma de granos, más perlita con presencia eutéctica fosfórica; el área ocupada por la perlita, en la estructura, es menos del 2 %. Estructura de la eutéctica fosfórica "doble y triple", con grandes inclusiones de eutéctica de 10 000 μK^2 hasta 16 000 μK^2 , que posee una resistencia máxima a la tracción de 397,6 MPa y una elongación igual a 12,8 %.



Figura 6. Muestra sin atacar



Figura 7. Muestra atacada

3.1. Análisis estadístico de los resultados

Aunque el procesamiento estadístico refleja que los mejores resultados de resistencia máxima a la tracción de 552,4 MPa se logran cuando el vertido vibratorio se realiza a frecuencia de 75 Hz y a una temperatura de 1 425 °C, no se recomienda establecer como el régimen adecuado, desde el punto de vista metalúrgico. Se corroboró que al utilizar el

vertido vibratorio a 70 Hz, a una temperatura de vertido de 1 450 °C, se obtiene una mejor estructura, más homogénea, de grafito nodulizado, con una matriz ferrítica-perlítica, para de esta forma proporcionar los mejores resultados estructurales y una adecuada resistencia a la tracción.

A partir de los resultados experimentales se determinó que el método de vertido vibratorio debe utilizarse con una frecuencia de vibración de 75 Hz, a una temperatura de vertido de 1 425 °C, lo que posibilitaría reducir hasta un 10 % la masa tecnológica del nodulizante. Con estas condiciones se obtiene la mejor estructura de la matriz ferrita y mayor cantidad de perlita; en este caso el grafito ocupa un área, en la estructura, de entre 8 % a 12 %, mientras que el área ocupada, por perlita, está entre 20 % y 45 %. Estas características permitieron obtener los mejores resultados de resistencia máxima a la tracción con un valor de 508,1 MPa (Figura 8).

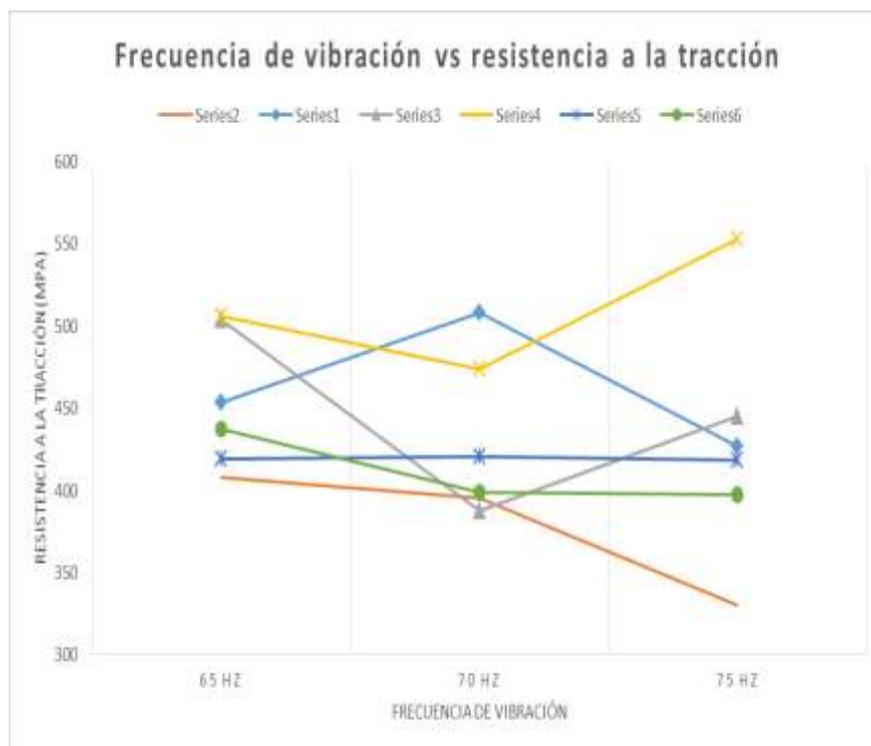


Figura 8. Frecuencia de vibración vs. resistencia a la tracción.

La frecuencia de vibración igual o mayor a 75 Hz no debe utilizarse en la producción de hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal, porque se hace necesario incrementar demasiado la temperatura de enfriamiento; además, propicia que se obtenga una matriz de una microestructura compuesta por ferrita en forma de granos, perlita y eutéctica fosfórica con un 12 % de grafito, menos de un 2 % de perlita y

una estructura de la eutéctica fosfórica "doble y triple". Para esas condiciones se evidencia un área ocupada por las grandes inclusiones de eutéctica de 10 000 μK^2 hasta 16 000 μK^2 , lo que conduce a la disminución en la resistencia máxima a la tracción a 397,6 MPa.

4. CONCLUSIONES

Con el método de vertido vibratorio, a una frecuencia de 70 Hz y temperatura de vertido de 1 450 °C, se garantizan los mejores resultados, una adecuada distribución de ferrita más perlita en la estructura nodular de la matriz y se propicia una resistencia adecuada a la tracción de 508,1 MPa

5. REFERENCIAS

- ALONSO, G.; STEFANESCU, D.; SUÁREZ, R.; LOIZAGA, A. & ZARRABEITIA, G. 2014: Kinetics of Graphite Expansion during the Eutectic Solidification of Cast Iron. *International Journal of Cast Metals Research* 27(2): 87-100.
- DAVIS, K. G. 1999: Dissolution of Mg-Fe-Si alloy during "In mold" treatment. *British Foundryman* (8).
- ILARDUYA. 2010: Nodulizantes. Consulta: 9 sept 2014. Disponible en: <http://www.ilarduya.com/aditivos.htm>.
- KARSAY, S. 1992: *Producción de hierro nodular*. 2da ed. Titanic Inc. Company.
- LUFFE, A. 1994: Modificación del hierro con grafito esferoidal en el molde. *Liteinoe Proistbostba* (12).
- METZGER, M. & SEIFERT, T. 2015: Computational assessment of the microstructure-dependent plasticity of lamellar gray cast iron - Part II: Initial yield surfaces and directions. *International Journal of Solids and Structures*. 66: 194-206
- MINGFANG, Z.; LEI, Z.; HONGLEI, Z. & DORU, M. 2015: Modeling of microstructural evolution during divorced eutectic solidification of spheroidal graphite irons. *Acta Materialia* 84: 413-425.
- PINA, J.; KOUZNETSOVA, V. & GEERS, M. 2015: Thermo-mechanical analyses of heterogeneous materials with a strongly anisotropic phase: the case of cast iron. *International Journal of Solids and Structures* 63: 153-166.
- SÁNCHEZ-FIGUEREDO, R. 2007: *Tecnología para obtención de fundidos con grafito esferoidal por el método "In mold" asistida por computadora*. Roberto Pérez Rodríguez (Tutor). Tesis de maestría. Universidad de Holguín.

ZHANG, L.; ZHAO, H. & ZHU, M. 2015: Simulation of solidification microstructure of spheroidal graphite cast iron using a cellular automation method. *Acta Metallurgica* (Chinese Edition) 51(2): 148-158.

Rigoberto Pastor Sánchez-Figueroa. rigo@facing.uho.edu.cu
Universidad de Holguín “Oscar Lucero Moya”. Cuba.

Asdrúbal Braulio García-Domínguez. asdrubal.garcia@reduim.edu.cu
Universidad de Camagüey “Ignacio Agramonte y Loynaz”. Cuba

Roberto Pérez-Rodríguez. roberto.perez@facing.uho.edu.cu
Universidad de Holguín “Oscar Lucero Moya”. Cuba.

Isnel Rodríguez-González. irgonzalez@ismm.edu.cu
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”. Cuba.