

# Influencias del vibro vertido en la obtención de fundidos metálicos más competitivos, sostenibles y sustentables

## Influences of the I vibrate poured in the obtaining of having fused metallic more competitive, sustainable and sustainable

Dr. C. Rigoberto Pastor Sánchez Figueredo<sup>1</sup>; Dr. C. Roberto Pérez Rodríguez<sup>2</sup>; Dr. C. Asdrúbal Braulio García Domínguez<sup>3</sup>; MSc. Fausto Hernán Oviedo Fierro<sup>4</sup>

Facultad de Ingeniería. Universidad de Holguín ([rigo@uho.edu.cu](mailto:rigo@uho.edu.cu)<sup>1</sup> /[roberto.perez@uho.edu.cu](mailto:roberto.perez@uho.edu.cu)<sup>2</sup> / Universidad de Camagüey ([asdrubal.garcia@reduc.edu.cu](mailto:asdrubal.garcia@reduc.edu.cu)<sup>3</sup> / Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica, Quito, Ecuador. [fausto.oviedo@epn.edu.ec](mailto:fausto.oviedo@epn.edu.ec)<sup>4</sup>

### RESUMEN

La presente investigación tiene por objetivo la eliminación de poros, sopladuras e inclusiones no metálicas y disminución de las mazarotas de los fundidos de metales ferrosos y no ferrosos, además de la obtención de la fundición con grafito nodular esférico AISI 400-12 por modificación "In mold" con la utilización de vibraciones y la determinación de la microestructura y sus propiedades mecánicas. Los niveles de temperatura de vertido se adecuaron al espesor de pared de las probetas. Como variables independientes se establecieron la frecuencia de vibración (65 Hz, 70 Hz, 75 Hz), la temperatura de vertido (1 450 oC y 1 425 oC) y la masa de aleación nodulizante FeSiMg (NODULAN II) (189,98 g; 170,99 g; 151,99 g), calculada por el método tradicional. El método vibratorio aplicado provocó cambios en la morfología del metal, al obtenerse una alta esferoidización para todos los niveles de masa de aleación modificante y se alcanzaron nódulos más pequeños (de 40 µm a 60 µm de diámetro). La resistencia a la tracción y la elongación relativa de las probetas obtenidas por el método vibratorio, fueron similares a las normas internacionales para este tipo de fundiciones y más altas que la fundición con grafito nodular esférico obtenida en condiciones estáticas. La investigación demostró que la tecnología "In mold" con el método vibratorio es una propuesta válida para la industria por la flexibilidad y economía del proceso, la estabilidad de la microestructura y las propiedades mecánicas obtenidas. Además, el método vibratorio de fundición minimiza los defectos que son observados usualmente en la fundición con grafito nodular esférico, producido por la modificación "In mold".

**Palabras claves:** fundición nodular; In mold; grafito nodular esferoidal; método vibratorio.

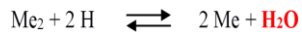
### ABSTRACT

The present investigation has as an objective the elimination of pores, blowholes and non-metallic inclusions and decrease of the feeders of the ferrous and non-ferrous metal melts, besides the obtaining of the casting with spherical nodular graphite AISI 400-12 by modification "In mold" with the use of vibrations and the determination of the microstructure and its mechanical properties. The pouring temperature levels were adapted to the wall thickness of the specimens. The vibration frequency (65 Hz, 70 Hz, 75 Hz), the pour temperature (1 450 oC and 1 425 oC) and the mass of FeSiMg nodularizing alloy (NODULAN II) (189.98 g; 170.99 g; 151.99 g), calculated by the traditional method. The vibratory method applied caused changes in the morphology of the metal, as a high spheroidization was obtained for all levels of the modifying alloy mass and smaller nodules were reached (from 40 µm to 60 µm in diameter). The tensile strength and the relative elongation of the specimens obtained by the vibratory method were similar to international standards for this type of foundries and higher than casting with spherical nodular graphite obtained in static conditions. The research showed that the technology "In mold" with the vibratory method is a valid proposal for the industry for the flexibility and economy of the process, the stability of the microstructure and the mechanical properties obtained. In addition, the vibratory casting method minimizes the defects that are usually observed in cast iron with nodular spherical graphite, produced by the modification "In mold".

**Key words:** nodular cast iron; In mold; spheroidal nodular graphite; vibratory method.

## INTRODUCCIÓN

Las metales y aleaciones se caracterizan porque se pueden vaciar del horno para obtener piezas de diferentes tamaños y complejidades. En su estado de fusión los metales que componen el caldo metálico tienen como particularidad que, al reaccionar con el H<sub>2</sub> del aire, forman metal libre más vapores de agua según las reacciones:



El mecanismo de enfriamiento y solidificación ocurre al formarse las dendritas, este vocablo se deriva del latín dendrón que significa ramificaciones, orientadas desde la periferia al centro y desde los puntos de nucleación, durante este proceso de cristalización los vapores de agua quedan alojados dentro del fundido formando poros, sopladuras e inclusiones no metálicas y producto de la contracción se obtienen rechupes y fregaderos profundos, que inciden en la calidad interna y externa de las piezas, por lo que la literatura especializada concluye que no se pueden obtener fundidos sanos de poros y sopladuras por métodos tradicionales de colada.

Las fundiciones grises ordinarias se caracterizan por la presencia del grafito en láminas en medio de una matriz perlítica o ferrítica. La lámina de grafito en la fundición gris actúa como concentradora de tensiones, haciéndolo extremadamente susceptible a la rotura frágil en comparación con el grafito nodular esférico de las fundiciones dúctiles. Para obtener la estructura nodular esférica es necesario modificar el caldo de fundición a través de nodulizantes, que son aleaciones que contienen Si y elementos como Mg, Ce o Ca, la típica es la aleación nodulizante FeSiMg, estos elementos promueven la transformación del grafito en láminas en nódulos esféricos, lo que mejora las propiedades mecánicas, y la colabilidad.

La presencia de azufre en el caldo metálico constituye una variable sensible en relación con la morfología de crecimiento del grafito en las fundiciones y según la reacción (2) La acción des modificadora del S provoca el desvanecimiento del Mg y la tendencia de la esfera de grafito a regresar a su estado laminar.



El hierro gris de alta resistencia con grafito nodular esférico también es conocido como hierro con grafito esferoidal, hierro nodular, hierro dúctil y fundición gris con grafito esferoidal. En esta investigación se asume la denominación de fundición con grafito nodular esférico, según las normas UNE 36 111 y UNE 36 118.

Entre las propiedades más relevantes de la fundición con grafito nodular esférico se pueden destacar su elevada resistencia mecánica, una buena ductilidad y resiliencia. La finura de los componentes de la matriz les confiere una mayor dureza respecto a las fundiciones con grafito en láminas, si bien la fundición con grafito nodular esférico es más fácil de mecanizar que éstas. También se consigue una excelente estanqueidad, un buen grado de pulido y una buena resistencia a la corrosión. Resisten al calor y al choque térmico, y presentan un buen coeficiente de frotamiento y resistencia al desgaste, tanto en seco como con lubricación [Asenjo, et al., 2011; Gregorutti y Grau, 2014].

La demanda mundial de artículos de fundición con grafito nodular esférico ha posibilitado que una gran cantidad de investigadores [Bernard, 1964; Brown-Boveri, 1964; Electrophysikallische, 1969; Lester, 1961] hayan desarrollado una variedad de métodos para satisfacer las complejas particularidades que intervienen en la nodularización de la fundición, entre las que se pueden citar [Batista-Cabrera, 1999; Batista-Cabrera y Ordoñez-Hernández, 1999; Smirnov, et al., 1989]:

- El tiempo de modificación de grafito en láminas a grafito nodular esférico debe ser el menor posible, desde la aplicación del nodulizante hasta la aparición de los microcristales en el comienzo de la solidificación, para evitar la desmodificación.

- La disolución del nodulizante debe ser rápida y homogénea durante todo el proceso de modificación, para obtener una nodularización uniforme en la fundición con grafito nodular esférico.
- La sobresaturación de la disolución del nodulizante no debe fluir al interior de la cavidad del molde, para evitar el rechazo de la pieza por defectos superficiales, escorias e inclusiones no metálicas.

Se han desarrollado métodos de modificación en el horno, la cazuela y el molde. Según Davis, la modificación “In mold” [Davis, 1999], se caracteriza por aplicar el nodulizante granulado en una cámara anterior al molde diseñada tecnológicamente para cumplir con los parámetros que intervienen en la modificación. Tiene grandes ventajas en cuanto a otros métodos de obtención de la fundición con grafito nodular esférico: economía del modificador (asimilación del Mg entre un 80 % y un 90 %), simplificación del proceso productivo, disminución del piroefecto y aumento de las propiedades mecánicas.

En resumen, la modificación “In mold”: (a) facilita el proceso productivo al hacerlo más industrial y viable para producir distintos tipos de fundición con grafito nodular esférico y de fundición con grafito en láminas a partir del mismo caldo, (b) se minimizan los efectos negativos del nodulizante, (c) se utilizan menores cantidades de nodulizante, influyendo en el aspecto económico, y (d) puede ser controlado más eficazmente.

A pesar de estas condiciones favorables que propicia la modificación “In mold”, las empresas fundidoras a nivel mundial no han logrado establecer de manera estable una tecnología de obtención de fundición con grafito nodular esférico, debido a que aún con la aplicación de los nuevos conceptos y medidas de calidad, este proceso presenta un bajo Rtg.

La modificación “In mold” requiere de una cámara de reacción tecnológicamente adecuada, que frecuentemente es excesivamente grande para poder contener la gran cantidad de aleación nodulizante, lo que disminuye el Rendimiento Metálico e influye negativamente en el Rtg del proceso productivo.

El índice de rechazo es alto, debido a que resulta muy frecuente los rechazos de piezas por mala calidad superficial, presencia de escorias e inclusiones no metálicas, debido a la introducción en el molde de los restos de la sobresaturación de las reacciones de modificación del caldo metálico. Estas adversidades se acentúan a medida que aumenta la masa de la pieza fundida, por necesitar una mayor cantidad de aleación nodulizante. Esto ocasiona un aumento del flujo de la aleación nodulizante no disuelta hacia la pieza que, aunque se obtiene con una estructura adecuada, se tiene que descartar por los defectos internos de poros, sopladuras e inclusiones no metálicas, y por la calidad superficial. De esta manera se limita la utilización de la modificación “In mold” cuando aumenta la masa del fundido a obtener. Además, la modificación “In mold” se caracteriza por una alta pérdida metálica, debido a la gran masa de metal desmodificado resultante de la acción del azufre.

Los autores analizados refrendan la calidad de las fundiciones con grafito nodular esférico en cuanto a sus propiedades mecánicas, propiedades de fundición y a su costo relativo inferior al de los aceros. Le proporcionan a la microestructura y a los factores que la afectan la máxima importancia, tanto a la matriz como a la cantidad y forma del grafito, definiendo como tendencia actual la búsqueda de tecnologías, composiciones químicas, nodulizantes y aditivos que impidan la degeneración del grafito y la obtención de una baja nodularidad.

**Objetivo general** de la investigación lo constituye la eliminación de poros, sopladuras e inclusiones no metálicas y disminución de las mazarotas de los fundidos de metales ferrosos y no ferrosos, además de la obtención de la fundición con grafito nodular esférico AISI 400-12 por modificación “In mold”.

## DESARROLLO

El método de vertido vibratorio consiste en colocar los moldes sobre una plataforma vibratoria, en la que se ha instalado un vibrador, y realizar el vertido del caldo metálico manteniendo el régimen vibratorio hasta la solidificación total de la pieza [ Sánchez-Figueredo, et al., 2015].

En la presente investigación, se plantea como hipótesis que al aplicar diferentes frecuencias de vibración durante el vertido y solidificación en el proceso fundición por la modificación “In mold”, se aumentará el

rendimiento de la cantidad de aleación nodulizante tecnológicamente necesaria y se disminuirá apreciablemente el índice de rechazo de piezas por poros, sopladuras, inclusiones no metálicas y cambiar la forma y la profundidad de la penetración de los rechupes, facilitando de esta forma su implementación industrial.

La colaboración científica concurrente entre Sánchez-Figueroa y Pérez-Rodríguez de la Universidad de Holguín, de García-Domínguez de la Universidad de Camagüey, de Alexey Nikoláevich Smirnov de la Universidad Técnica Nacional de Donetsk y Efimov V.A., Eldarjanov A.S. y Ten E. del Campus Aceros y sus aleaciones de la Universidad Tecnológica de Moscú, permitió conocer los reportes de investigaciones precedentes sobre solidificación de las aleaciones metálicas bajo influencias externas [Efimov y Eldarjanov, 2004; Smirnov, et al., 2002b; Smirnov, et al., 2002a].

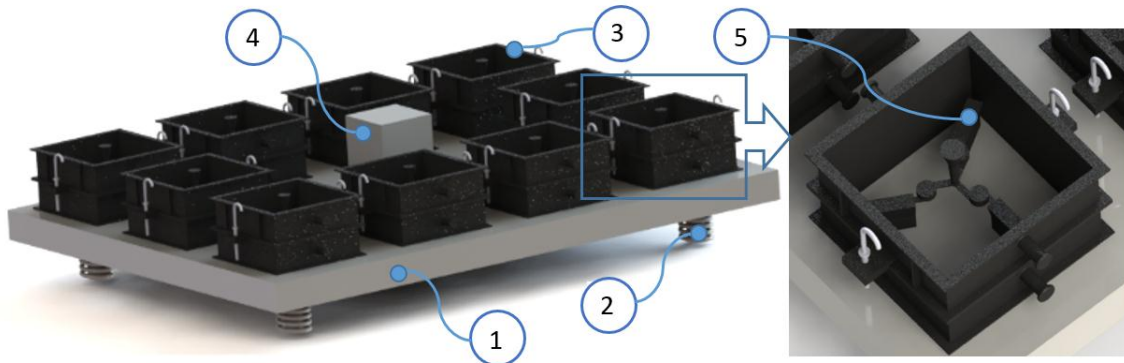
Desde 1995, Sánchez-Figueroa [Sánchez-Figueroa, 2012a; Sánchez-Figueroa, et al., 2013a; Sánchez-Figueroa, et al., 2016a; Sánchez-Figueroa, et al., 2013b; Sánchez-Figueroa y Quesada-Estrada, 2015; Sánchez-Figueroa, et al., 2015a; Sánchez-Figueroa, et al., 2013c; Sánchez-Figueroa, et al., 2013d] (autor de la presente investigación) aplicó el tratamiento con vibraciones en los bancos de coquillas de la Fábrica de Cafeteras de la EIMPUD “Primero de mayo” en la Provincia de Villa Clara. En la aplicación, se unió la estructura metálica de los bancos de coquillas del vaso inferior, vaso superior y la tapa de las cafeteras KUPRES al pedestal metálico del electromotor que energiza los cilindros neumáticos, para aprovechar las vibraciones que el mismo trasmite.

Se reguló la frecuencia de vibración a 40 Hz con cuatro calzos de material compuesto de goma e insertos metálicos en las bases de los bancos de coquillas, según el torque de los tornillos de anclaje. De esta manera se aplicó el método vibratorio, logrando aumentar el copiado de la cavidad interior del molde metálico, se disminuyó el espesor de las paredes de las cafeteras aumentando la estanqueidad, se disminuyó la norma de consumo de Al, ahorrando los portadores energéticos durante su explotación al permitir un calentamiento más rápido.

En 1998, Sánchez-Figueroa [Sánchez-Figueroa, 2009a; Sánchez-Figueroa, 2009b; Sánchez-Figueroa, 2012b; Sánchez-Figueroa, et al., 2013d] utilizó el método vibratorio en la eliminación del rechupe en fundidos de bronce en la DIFAE en Planta Mecánica de Santa Clara “Fabric Aguilar Noriega”, disminuyendo el consumo de chatarra de bronce, al ser menor el tamaño de las mazarotas. En la Empresa de Fundición de Acero e Hierro de Holguín, Sánchez-Figueroa [Sánchez-Figueroa, 2009a; Sánchez-Figueroa, 2009b; Sánchez-Figueroa, 2012b], estableció una tecnología del método vibratorio que permitió la eliminación de los poros y sopladuras de los fundidos de cuproaleaciones.

En el año 2010, Sánchez-Figueroa et al. establecieron una tecnología de obtención de fundición con grafito nodular esférico por el método vibratorio en la Empresa de Fundición de Acero Hierro de Holguín, conjuntamente con el Laboratorio Metalográfico del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Holguín [Sánchez-Figueroa, 2011]. En la investigación se analizó la influencia de la frecuencia de vibración en la obtención de la fundición con grafito nodular esférico por el método de vertido vibratorio. Los resultados de estos análisis marcaron la gran diferencia de las estructuras cristalográficas obtenidas por los métodos estáticos y vibratorios.

Se seleccionó el taller de fundición de la Empresa Mecánica de Holguín del GESIME, perteneciente al Ministerio de Industrias, donde se utiliza un horno de cubilote de 700 mm de diámetro interior para la producción de las aleaciones ferrosas y se parte para la experimentación del vertido en el molde a temperaturas de 1 450 oC y 1 425 oC. El parámetro de control principal estuvo centrado en el control de las temperaturas de sangrado de 1 480 oC a 1 470 oC en la piquera del cubilote. Esto exigió el cumplimiento estricto de las normas técnicas de la fusión y la calidad del coque utilizado, así como un manejo adecuado de la tecnología teniendo en cuenta las referencias estudiadas y el cumplimiento de la disciplina tecnológica en cuanto al control de los parámetros tecnológicos del cubilote.



**Figura 1.** Ilustración de la plataforma vibratoria usada en la investigación (1: Plataforma vibratoria, 2: Resortes, 3: Moldes de fundición, 4: Vibrador electromagnético, 5: Fundido).

El método de vertido vibratorio consiste en colocar los moldes sobre una plataforma vibratoria (Figura 1) 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 y cambia la forma y la profundidad de la penetración de los rechupes; así como según la hipótesis de la presente investigación propicia la formación del grafito nodular esférico. Esto debe ocurrir debido a que, al formarse los puntos de cristalización primarios, las vibraciones deben desmenuzar esta fase y multiplicar los puntos de cristalización e incrementar la velocidad de enfriamiento y solidificación del fundido a niveles más altos que la velocidad de desmodificación que debe producir el Mg y garantizar la obtención de una estructura esferoidal estable y proporcionar un régimen homogéneo de modificación, así como mejores condiciones de fundición para el llenado y la extracción de gases e impurezas.

Fueron observadas con un aumento de 100 X y luego atacadas químicamente con una solución de Nital al 5 % en un microscopio metalográfico. Después de atacadas los aumentos empleados fueron de 100 X a 500 X (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 utilizó un microscopio óptico-metalográfico de la marca “Carl Zeiss” modelo: Neophot 30, con lentes planocromáticas HD (3.2x / 0.60 ∞ / -A; 12.5x / 0.25 ∞ / -A); HD 25x / 0.50 ∞ / 0 –A; (50x / 0.90 ∞ / -A); HD HI 100x / 1.30 ∞ / 0 –A.

Se utilizaron las normas ASTM E 407 – 70 (Reaprobada en 1989) y ASTM E 3 – 80 (Reaprobada en 1986); la norma UNE 36111- 36118. Antes de atacar escalas 6, 7, /8, 9, 10, 10a y después de atacar escalas 1, 2, 3 y 4. (GOST 3443 - 77R87), y la clasificación de la base metálica: GOST 3443- 77R87

En el análisis de la composición química se utilizó un espectrómetro multicanal digital modelo SPECTROLAB No 6536. El estudio radiográfico se efectuó con un equipo Portátil de Rayos X tipo Y.XPO 225. Modelo Y.XPO 225 DO2, Fabricante YXLON International A.S. in Copenhagen ~Danmark, Dinamarca. N° de Serie 64091.

Se realizó el ensayo de resistencia a la tracción bajo las siguientes condiciones técnicas: tipo de probeta cilíndrica, norma utilizada ASTM E 8M-93. Se utilizó una máquina universal de fuerza P-20 de fabricación rusa con certificado de verificación número 15-03, número de serie: 1221, escala (tf) de 10.0, U Calibración para k= 2 +- 0,89, Rango de medición (tf): 0 – 10.0.

El ensayo de dureza Brinell fue realizado bajo las siguientes condiciones: tipo de probeta plana, norma utilizada ASTM E 10 – 07/ A 956 – 00. Se utilizó un durómetro Rockwell-Brinell IBERTEST con certificado de verificación número 53-25-02/11, número de serie 27336, escala (kgf/mm<sup>2</sup>) 2.5/187.5/30, Hcalibración para k = 2 (%): +- 0,30 con rango de medición (kgf/mm<sup>2</sup>) de 40 – 300.



## Resultados de los ensayos de las microestructuras

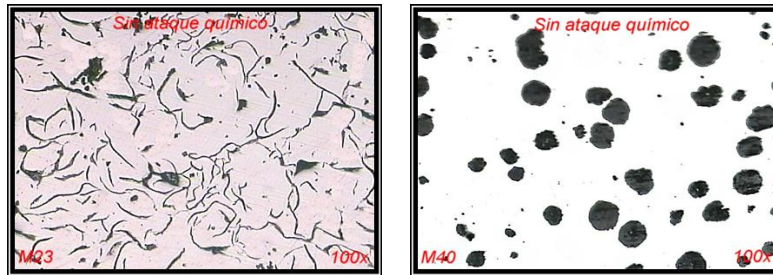


Figura 2. Probetas obtenidas por: vertido estático (laminar) y método vibratorio (esferoidal)

En el análisis de varianza, según la herramienta estadística Statgraphics\_Plus-5.1\_Pro\_Esp. Para el caso del vertido estático por modificación “In mold”, donde se obtuvieron las probetas patrón de la fundición ISO 400-12, el diámetro máximo de los nódulos se encontró entre 60  $\mu\text{m}$  y 100  $\mu\text{m}$  para una masa de aleación nodulizante de 189,98 g. Al disminuir esta masa en un 10 % y en un 20 %, se obtuvo grafito en láminas. Por el contrario, para el caso de las probetas obtenidas por el método vibratorio, para las tres masas de aleación nodulizantes analizadas y para las tres frecuencias de vibración utilizadas, se obtuvieron nódulos con un diámetro máximo entre 40  $\mu\text{m}$  y 60  $\mu\text{m}$ .

Lo que demuestra que durante el régimen vibratorio se propicia una agitación necesaria para establecer un régimen de enfriamiento y solidificación que favorece de manera apreciable la velocidad de nucleación y al haber más núcleos con diámetros menores, hay un proceso de grafitización y nodularización más rápido de ese grafito. Luego, al aumentar la frecuencia de vibración a partir de 65 Hz se observa la eliminación de los defectos internos, lo que constituye una validación importante de lo expuesto en la hipótesis de la investigación.

El vertido vibratorio facilita el desmenuzamiento de las dendritas aumentando los puntos de cristalización que favorecen que se efectúe el mecanismo de enfriamiento y solidificación antes del desvanecimiento del Mg, por lo que se logra detener la acción desmodificadora del S y obtener grafito nodular esférico con un nodularidad superior al 95 % y nódulos menores con un mejoramiento de las propiedades mecánicas. porque ocurre una adecuada velocidad de nucleación, que constituye un acelerador del proceso de enfriamiento, lo que evita el efecto desmodificador del Mg y ejerce un efecto positivo sobre la velocidad y homogeneidad de disolución de la aleación nodulizante.

El empleo del método vibratorio facilita la orientación homogénea del mecanismo de enfriamiento y solidificación con consecuencias favorables como el afino de los granos propiciando la mejora estructural al crear un efecto termodinámico beneficioso al proceso de solidificación (equivalente a la obtenida por tratamientos térmicos) y la eliminación de los defectos internos como licuación, poros, sopladuras e inclusiones no metálicas y cambia la forma y la profundidad de la penetración de los rechupes, Además, al garantizar un mayor número de centros de cristalización e influye en el proceso de avance del frente de solidificación en el plano vertical y favorece el mejoramiento de las propiedades mecánicas de las piezas,.

En todos los casos, los valores de los ensayos realizados están entre los parámetros correspondientes a las normas internacionales, que para las fundiciones con grafito nodular esférico ISO 400 – 12.

Calidad externa: Las piezas de fundición con grafito nodular esférico modificada “In mold” tradicional, clasifican como piel de elefante o de naranja [Gost\_60\_07-75, 1975], lo que exige tenerse en cuenta al seleccionar las sobre medidas para el maquinado y el método de limpieza, con el consiguiente encarecimiento de la pieza. Aplicando ese sistema al caso de esta investigación, se concluye que las piezas en bruto obtenidas con la aplicación de vibraciones durante el vertido y solidificación, obtienen una superficie tipo manzana, mientras que con el vertido estático la superficie es rugosa como la de la naranja y el elefante. Esto tiene una clara influencia sobre el proceso de limpieza, maquinado y sobre los costos de la fundición (Figura 3).

Análisis de la calidad de las piezas



Pieza con vertido vibratorio.  
Calidad superficial de piel de manzana

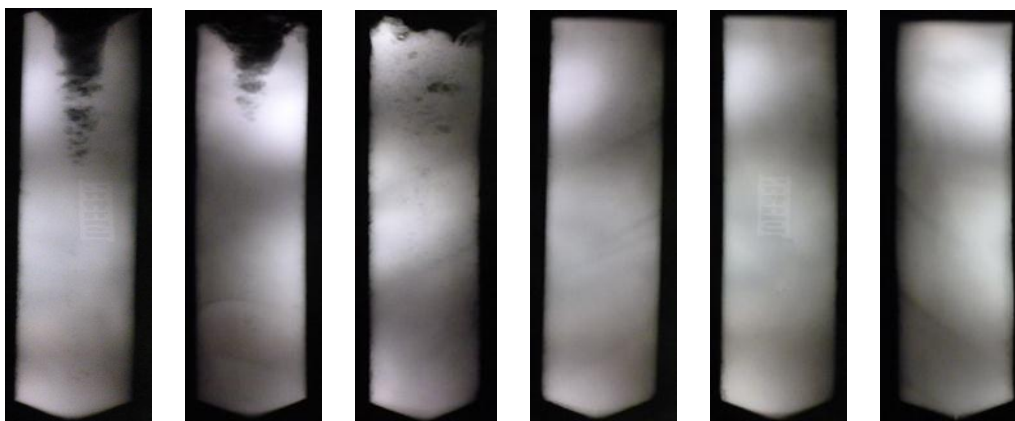
Pieza con vertido estático.  
Calidad superficial de piel de naranja

Pieza con vertido estático.  
Calidad superficial de piel de elefante

Figura 3. Pieza obtenida con vertido y solidificación aplicando vibraciones y modificación “In mold” (izquierda) y pieza obtenida con vertido estático (centro y derecha).

En el caso de la calidad interna, queda evidenciado en los resultados de las propiedades mecánicas de las probetas, cuyos parámetros se corresponden perfectamente al de las normas internacionales ISO 1083 y ASTM A536, así como la comparación realizada con las normas GOST.

**Calidad interna:** En la Figura 4 se muestra el estudio radiográfico realizado con un equipo portátil de Rayos X modelo Y.XPO 225 DO2, permite observar como con el vertido estático tradicional se producen un significativo número de defectos internos como lo son poros, sopladuras, inclusiones no metálicas y la forma y profundidad del rechupe que al ir aplicando vibraciones durante el vertido y solidificación, se observa una disminución considerable de los mismos según se aumenta de 40 Hz hasta 60 Hz y al aumentar la frecuencia de vibración a partir de 65 Hz se observa la eliminación de los defectos internos, lo que constituye una validación importante de lo expuesto en la hipótesis de la investigación



40 Hz

50 Hz

60 Hz

65 Hz

70 Hz

75 Hz

**Figura 4.** Radiografías de las muestras obtenidas con vertido vibratorio (40 Hz-75 Hz).

## VALORACIÓN ECONÓMICA

Tabla 1. Comparación de los parámetros económicos de los métodos estático y vibratorio.

El comportamiento del rendimiento metálico es de un 77 %, debido que la masa neta aumenta a 770 kg de fundido, el índice de rechazo disminuye a un 0,5 % y la pérdida metálica disminuye a 10 kg. Esto se debe a que el método vibratorio aumenta el Rtg hasta un 75,08 %, con una disminución de los gastos totales y el costo de producción a 2 051,67 CUP/t de fundido; se obtiene un precio de 2 254,39 CUP/t de fundición con grafito nodular esférico. Esta variación del Rtg genera un decremento de un 55,46 % de los costos de producción y un 57,78 % de los precios, lo que posibilitan la producción a escala industrial de la modificación “In mold”.

El método vibratorio de obtención de fundición con grafito nodular esférico al incidir de manera positiva en el Rtg, lo aumenta, propiciando así la disminución de la norma de consumo. Es decir, se disminuye la cantidad de materias primas, materiales y un ahorro del 39 % de portadores energéticos, disminuyendo la emisión de gases nocivos a la atmósfera y la generación de desechos sólidos en un 40 % por toneladas de fundido, y también una disminución de los gastos y costos de producción en un 38,96 % del importe anterior con la utilización del vertido estático [Sánchez-Figueroa, 2010a; Sánchez-Figueroa, 2010b] de una manera competitiva, sostenible, sustentable y resiliente.

No	Denominación	Tipo de vertido		Diferencia
		Estático	Vibratorio	
1	Rendimiento tecnológico general (%)	29,26	75,08	45,82
2	Rendimiento metálico (%)	70	77	7
3	Masa neta del fundido (kg)	700	770	70
4	Índice de rechazo (%)	5	0,5	4,5
5	Masa total del rechazo (kg)	50	5	45
6	Pérdida metálica (%)	56	2	54
7	Masa del metal desmodificado y lingoteado (kg)	550	10	540
8	Norma de consumo del nodulizante (Nodulan II)	0,1094	0,0293	0,0801
9	Gastos totales o costo de producción (\$/t)	3 698,95	2 051,67	1 683,28
10	Precio (CUP)	3 901,68	2 254,39	1 647,29
11	Decremento promedio del costo y precio (%)			56,6





## CONCLUSIONES GENERALES

1. Se comprobó que utilizando vibraciones durante el vertido y la solidificación por modificación “In mold” de la fundición ISO 400-12 con cantidades menores de masa de aleación nodulizante (entre un 10 % y un 20 %) respecto a la masa tecnológicamente calculada, se logra una excelente nodularización, por tanto, se aumenta el rendimiento de la aleación nodulizante y se disminuye el Índice de Rechazo, lo que favorece su implementación industrial.
2. El uso de frecuencias de vibración de 65 Hz, 70 Hz y 75 Hz permite aumentar la calidad interna y superficial de las piezas de fundición ISO 400-12 con grafito nodular esférico modificado “In mold”, ya que facilita el llenado del molde, la disolución de la aleación nodulizante, la interacción del Mg con la aleación y la elevación de las partículas gaseosas y no metálicas hacia las partes superiores del molde que son eliminables, además disminuye la profundidad de la penetración del rechupe, lo que facilita la disminución de las mazarotas hasta un 65 %. Se facilita, además, una mejor interface metal-molde, lo que asegura la calidad superficial.
3. El uso de frecuencias de vibración de 65 Hz, 70 Hz y 75 Hz durante el proceso de solidificación de la fundición ISO 400-12 facilita la elevación de la velocidad de nucleación, lo que provoca una reducción considerable del tamaño de los nódulos (40  $\mu\text{m}$  - 60  $\mu\text{m}$ ) y garantiza que la velocidad de nucleación y nodularización sea superior (más del 95 %) a la de desmodificación, en comparación con el patrón vertido estáticamente por modificación “In mold”, lo que contribuye al mejoramiento de las propiedades mecánicas.
4. Los mejores resultados de las propiedades metalográficas y mecánicas (dureza y resistencia a la tracción) de la fundición ISO 400-12 para masa de aleación nodulizante (NODULAN II) de 170,99 g, se obtuvo utilizando una frecuencia de vibración de 70 Hz y una temperatura de vertido de 1 425 oC.
5. La valoración económica realizada demostró que las piezas de fundición con grafito nodular esférico producidas usando el método vibratorio produce un ahorro significativo de materiales y materias primas (56,6 %), una disminución de los costos de producción en 1 647,29 CUP y una mejora del consumo de portadores energéticos (38,96 %).
6. Influyen de manera determinante al disminuir la masa de las piezas, equipos e implementos agrícolas, se necesita un motor de menor potencia para el movimiento de trabajo, que por lo general son más pequeños, lo que permite además disminuir la estructura que soporta al motor, lo que incide en la menor compactación de los suelos.

## RECOMENDACIONES

Desarrollar un megaproyecto sobre el uso del método vibratorio y otras influencias externas en el aumento de la competitividad, la sostenibilidad y la sustentabilidad de los procesos de fundición de metales ferrosos y no ferrosos en las Fundidoras del GESIME [(Marcel Bravo (hierro gris), 26 de julio (hierro gris), Bombas Camagüey (hierro gris), Planta Mecánica de Santa Clara “Fabric Aguiar Noriega” (hierro gris y acero), Vanguardia Socialista (Acero), Cubana de Bronce (bronce)]dirigido a:

1. Aumento del rendimiento metálico al disminuir del sistema de alimentación y mazarotas con el uso del método vibratorio.
2. Afino del grano con vistas a la eliminación de los tratamientos térmicos con el uso del método vibratorio.
3. Establecer metodologías de obtención de micro fundidos con el uso del método vibratorio.
4. Disminución del índice de rechazo con el aumento de la estanqueidad y la eliminación de poros, sopladuras e inclusiones no metálicas de las Válvulas, Cafeteras, etc.
5. Disminución del índice de rechazo con el aumento de la estanqueidad y la eliminación de poros, sopladuras e inclusiones no metálicas del enganche (muela) de ferrocarril, la rueda y demás códigos para ferrocarriles.



## RESUMEN DE LAS REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [Carnero, et al., 1999] A.A. Carnero, K.P. Bunin, E.D. Glebova, y M.I. Pritomanova, Tratamiento termocíclico del hierro fundido y el acero (en ruso) Vol. 167 Kiev: Техніка, 1999.
- [Electrophisikallische, 1969] Electrophisikallische, "A method for producing wear-resistant surfaces on spheroidal graphite iron," 1969. Número de aplicación: J28520. Espacenet. Liechtenstein. Organización: E. A. B. Berghaus. 1966-07-01. Patente No. 1,155,864.
- [Batista-Cabrera y Ordoñez-Hernández, 1999] A. Batista-Cabrera y U. Ordoñez-Hernández "Tecnología de desulfuración de fundiciones grises con el fin de obtener hierro con grafito esferoidal," Ingeniería Mecánica, Vol. 2, No. 1, pp. 57-62, 1999.
- [Sánchez-Figueroa, 2007] R.P. Sánchez-Figueroa, "Tecnología para obtención de fundidos con grafito esferoidal por el método "In mold" asistida por computadora," Centro de Estudios CAD/CAM, Universidad de Holguín, Holguín, Cuba, Tesis de Maestría 2007.
- [Smirnov, et al., 2002a] A.N. Smirnov, V.L. Pilyushenko, S.V. Момот, y V.N. Amitan, "Solidificación de las aleaciones metálicas bajo influencias externas (en ruso)," en Editorial VIK, U. T. N. d. Donetsk, Ed. Donetsk, 2002a, p. 169 Pág.
- [Efimov y Eldarjanov, 2004] V.A. Efimov y A.S. Eldarjanov, "Tecnologías metalúrgicas modernas (en ruso)," Moscú: Nobie Tecnologi, 2004.
- [Sánchez-Figueroa, et al., 2013c] R.P. Sánchez-Figueroa, A. Ronda-Oro, y A. Torres-García, "Reducción de las mazarotas en las piezas fundidas de acero el método de vertido dinámico," en VI Conferencia Científica Internacional de la Universidad de Holguín, Holguín, Cuba, 2013c.
- [Sánchez-Figueroa, et al., 2013d] R.P. Sánchez-Figueroa, A.N. Smirnov, A. García-Domínguez, y R. Pérez-Rodríguez, "Disminución de nodulizante en la obtención de fundidos de hierro con grafito esferoidal por el método de vertido dinámico," en VI Conferencia Científica Internacional de la Universidad de Holguín, Holguín, Cuba, 2013d.
- [Sánchez-Figueroa, 2012b] R.P. Sánchez-Figueroa, "Tecnología para la obtención de fundidos de cuproaleaciones sanos de poros y sopladuras," en XXXIII Convención Panamericana de Ingenierías. VI Conferencia Internacional de las Ingenierías Mecánicas, Eléctricas e Industrial (UPADI 2012), La Habana, Cuba, 2012b.
- [Sánchez-Figueroa, et al., 2015c] R.P. Sánchez-Figueroa, A. García-Domínguez, R. Pérez-Rodríguez, y I. Rodríguez-González "Influencia del vertido vibratorio en la resistencia a la tracción del hierro con grafito esferoidal," Minería y Geología, Vol. 19, No. 3, pp. 79-90, 2015c, Url: <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/download>, .
- [Sánchez-Figueroa, et al., 2016b] R.P. Sánchez-Figueroa, A. García-Domínguez, R. Pérez-Rodríguez, y I. Rodríguez-González "Influencia del vertido vibratorio en la matriz y dureza del hierro gris con grafito esferoidal," Ingeniería Mecánica, Vol. 19, No. 1, pp. 26-29, 2016b, Url: <http://www.ingenieriamecanica.cujae.edu.cu>.
- [Sánchez-Figueroa, et al., 2013g] R.P. Sánchez-Figueroa, R. Santana-Milán, y G. Plano-Miclin, "El comportamiento de la composición química en los fundidos metálicos obtenidos por el método de vertido dinámico," en VI Conferencia Científica Internacional de la Universidad de Holguín, Holguín, Cuba, 2013g.



## **SOBRE LOS AUTORES**

**Dr. C. Rigoberto Pastor Sánchez Figueredo.** Graduado de Ingeniero metalúrgico en la especialidad de fundición de metales ferrosos y no ferrosos de la Universidad Técnica de Azerbaiyán, y Master en CAD CAM CAE, Doctor por la Universidad de Holguín. Miembro del Grupo de expertos del GESIME. Investiga en los métodos modernos de vibro y micro fundido de metales ferrosos y no ferrosos. Vicedecano de Investigación y Postgrado. Facultad de Ingeniería. Universidad de Holguín. Cuba, Teléf. (+ 053) 24 482675 y 24 482737. Email: [rigo@uho.edu.cu](mailto:rigo@uho.edu.cu) , [rigo26760@gmail.com](mailto:rigo26760@gmail.com)

**Dr. C. Roberto Pérez-Rodríguez.** Ingeniero Mecánico, Doctor por la Universidad Politécnica de Cataluña en Barcelona, España. Director del Centro de Estudios CAD/CAM de la Universidad de Holguín. Miembro Titular de la Academia de Ciencias de Cuba. Investiga en los métodos y aplicaciones de las herramientas CAD/CAM/CAE/CAPP en la industria.