

# Trabajo de Diploma

Titulo: Propuesta para la obtención de válvulas con grafito esferoidal.

Autora: Anneris Acosta Escalona.

Holguín, 2021



# Trabajo de Diploma

Titulo: Propuesta para la obtención de válvulas con grafito esferoidal.

Autora: Anneris Acosta Escalona.

Tutores: Dr. C Rigoberto Pastor Sánchez Figueredo

Dr.C. Ana María Quesada Estrada.

Holguín, 2021



## **Dedicatoria**

A mis padres por haberme ayudado en los momentos difíciles, por haberme dado ánimo, dedicación y cariño durante estos cinco largos años. Al resto de la familia por apoyarme en todo momento para al fin culminar una etapa de mi vida y volverme una profesional.

## RESUMEN

La investigación realizada en este trabajo de diploma tiene como objetivo general aplicar vibraciones durante la obtención de válvulas de fundición con grafito nodular esférico libres de poros y sopladuras, para aumentar la hermeticidad de las válvulas y disminuir el índice de rechazo de válvulas por degeneración de la estructura metalográfica y la aparición de defectos internos y externos. Para dar cumplimiento al mismo se utilizaron métodos de investigación científica teóricos y empíricos. Se realizó una revisión bibliográfica actualizada sobre esta temática sobre las válvulas, materiales empleados y método de fabricación. Se definieron las tareas científicas a realizar y se obtuvo. Se evaluaron los procedimientos existentes de los métodos que intervienen en la producción de válvulas. Se elaboró la metodología de investigación y se crearon las condiciones experimentales para la utilización del método vibratorio. En esta investigación se puede comprobar que las válvulas en bruto obtenidas con la aplicación de vibraciones durante el vertido y solidificación, mejora la calidad interna que queda evidenciada en las propiedades mecánicas de las válvulas. La valoración económica realizada demostró que las válvulas de fundición con grafito nodular esférico producidas usando el método vibratorio producen un ahorro significativo de materiales y materias primas, una disminución de los costos de producción y una mejora del consumo de portadores energéticos.



## SUMMARY

The general objective of the research carried out in this diploma project is to apply vibrations during the obtaining of cast iron valves with spherical nodular graphite free of pores and blowholes, to increase the tightness of the valves and reduce the rate of rejection of valves due to degeneration of the metallographic structure and the appearance of internal and external defects. To comply with it, scientific, theoretical, empirical and computational research methods were used. An updated bibliographic review was carried out on this subject on the valves, materials used and manufacturing method. The scientific tasks to be carried out were defined and obtained. The existing procedures of the methods involved in the production of valves were evaluated. The research methodology was developed and the experimental conditions for the use of the vibratory method were created. In this research it can be verified that the raw valves obtained with the application of vibrations during the pouring and solidification, improves the internal quality that is evidenced in the mechanical properties of the valves. The economic valuation carried out showed that spherical nodular graphite cast iron valves produced using the vibratory method produce significant savings in materials and raw materials, a reduction in production costs and an improvement in the consumption of energy carriers.

## ÍNDICE

<i>INTRODUCCIÓN</i> .....	7
<i>CAPÍTULO 1. ANTECEDENTE Y ESTADO ACTUAL DE LA OBTENCIÓN DE VÁLVULAS DE FUNDICIÓN CON GRAFITO NODULAR ESFÉRICO.</i> .....	13
1.1. Válvulas y clasificaciones según su uso.....	13
1.2. Fundición con grafito nodular esférico por modificación “In mold” .....	17
1.3. Antecedentes tecnológicos en Cuba del uso de las vibraciones en el vertido de la fundición con grafito nodular esférico.....	19
<i>CAPÍTULO 2. TECNOLOGÍA PARA LA APLICACIÓN DE VIBRACIONES DURANTE LA OBTENCIÓN DE VÁLVULAS CON GRAFITO NODULAR ESFÉRICO LIBRES DE POROS Y SOPLADURAS</i> .....	20
2.1 Organización metodológica de la investigación .....	20
2.2 Metodología de cálculo de los parámetros para la obtención de válvulas con grafito nodular esférico modificado “In mold” .....	21
2.3 Metodología de cálculo del molde de fundición para la modificación “In mold” .....	23
2.3.1 Cálculo y diseño del sistema de alimentación .....	30
2.4 Tecnología para la elaboración de la fundición con grafito nodular esférico modificado “In mold” .....	35
2.5 Vertido y solidificación de las válvulas.....	37
2.6 Fundamentación del método vibratorio y construcción de la plataforma vibratoria .....	38
2.7 Mantenimiento.....	40
2.8 Valoración económica .....	44
<i>CONCLUSIONES GENERALES</i> .....	48
<i>RECOMENDACIONES</i> .....	49
<i>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i> .....	49
<i>ANEXOS</i> .....	67



## INTRODUCCIÓN

La fundición es un proceso de fabricación de piezas, comúnmente metálicas, que consiste en fundir un material e introducirlo en una cavidad, llamada molde, donde se solidifica. Este proceso tradicionalmente es realizado en arena, por ser ésta un material refractario muy abundante en la corteza terrestre y mezclada con arcilla, adquiere cohesión y moldeabilidad sin perder la permeabilidad que posibilita evacuar los gases del molde al tiempo que se vierte el metal fundido.

La tendencia en la industria metalmecánica mundial es la de sustituir las piezas de hierro fundido y acero, por hierro con grafito esferoidal, debido a que puede superarlos en cuanto a sus propiedades de fundición, menor densidad y menor costo por tonelada, siendo evidente fundamentalmente en la industria automovilística, la naval, la construcción de maquinarias y en la industria azucarera.

La industria metalmecánica manifiesta como tendencia mundial la sustitución de válvulas de acero y fundición gris ordinaria, por fundición con grafito nodular, debido a que puede superar al acero en cuanto a sus propiedades de fundición, menor densidad y menor costo por tonelada [Al-Ghonamy, *et al.*, 2012; Aristizábal, *et al.*, 2013; Jacas, *et al.*, 2005]. Estas ventajas se aprecian de manera más visible en la industria automovilística, la industria naval, la construcción de maquinarias y la industria azucarera, entre otras.

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.*, 2011a; Gregorutti y Grau, 2014].

Estas propiedades son aprovechadas en aplicaciones donde se requiere una resistencia mecánica elevada, un bajo alargamiento relativo y unas buenas características de fricción (cilindros de laminación, cigüeñales, engranajes, árboles de levas, discos de embrague, bancadas de máquinas herramienta, platos de torno, roldanas, soportes de juntas de cierre y la maquinaria agrícola). La buena estanqueidad se aplica en tuberías de fundición, cilindros de aceite de servomotores y cuerpos de amortiguadores hidráulicos, así como en la producción de válvulas. [Carrillo-Castro, *et al.*, 2013].

En la actualidad se importan válvulas de hierro y acero para ser utilizadas por las diferentes industrias en Cuba, como, por ejemplo: Recursos Hidráulicos, CUPET, CUBANIQUEL, acueductos y alcantarillados. Aunque se ha intentado la producción nacional de válvulas se continúan importando porque no cumplen con los parámetros de calidad, puesto que se pretende obtener válvulas de fundición con grafito nodular esférico para sustituir las importadas.

### **Situación problemática:**

La producción de válvulas a nivel nacional se caracteriza por tener el índice de rechazo alto, debido a que resulta muy frecuente que las válvulas por mala calidad superficial se desprecien, por 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 válvula fundida, por necesitar una mayor cantidad de aleación





nodulizante. Esto ocasiona un aumento del flujo de la aleación nodulizante no disuelta hacia la válvula que, aunque se obtiene con una estructura interna adecuada; se tiene que descartar por los defectos internos de poros, sopladuras e inclusiones no metálicas, y por la calidad superficial. Cuando se realizan las pruebas de hermeticidad los fundidos de válvulas se descartan porque los poros y sopladuras provocan salideros.

Teniendo en cuenta las particularidades industriales antes citadas, se identifica como **problema científico de la investigación** alto índice de rechazo por salideros de los cuerpos de válvulas.

Esta investigación tiene por **objeto de estudio** la obtención de válvulas de fundición con grafito nodular esférico libres de poros y sopladuras.

El **campo de acción** de la investigación abarca la aplicación de vibraciones durante la obtención de válvulas con grafito nodular esférico libres de poros y sopladuras con una adecuada estanqueidad y la hermeticidad de las válvulas.

Así, la investigación tiene como **objetivo general** aplicar vibraciones durante la obtención de válvulas de fundición con grafito nodular esférico libres de poros y sopladuras, para aumentar la hermeticidad de las válvulas y disminuir el índice de rechazo de válvulas por degeneración de la estructura metalográfica y la aparición de defectos internos y externos.

La investigación plantea como **hipótesis** que: Con la aplicación de vibraciones durante la obtención de válvulas con grafito nodular esférico libre de poros y sopladuras, se elimina el índice de rechazo por salideros de los cuerpos de válvulas.

Se definieron como **tareas científicas** de la investigación las siguientes:

- Evaluar los procedimientos existentes y los métodos que intervienen en la obtención de la fundición con grafito nodular esférico de las válvulas.

- Evaluar los procedimientos existentes y los métodos de tratamiento con vibraciones en la obtención de fundidos de metales ferrosos y no ferrosos. Esta revisión permite establecer el marco teórico de la investigación y la fundamentación de la hipótesis.
- Elaborar la metodología de investigación y crear las condiciones de experimentación para la aplicación de vibraciones durante el proceso de obtención de las válvulas.

### **Métodos de investigación utilizados**

A continuación, se exponen los principales métodos utilizados en la investigación, estos son:

- Método histórico-lógico: este se aplicó para establecer el estado del arte con respecto al método de fundición con nodularización del grafito en el molde y al uso de vibraciones durante el vertido y solidificación de aleaciones fundidas. Permitted establecer el marco teórico referencial, permitiendo identificar qué se ha investigado sobre el tema objeto de estudio, a fin de sustentar el objeto y el campo de la presente investigación.
- Método de inducción-deducción: se aplicó en la evaluación de los diferentes criterios que intervienen en la aplicación de vibraciones durante la obtención de válvulas con grafito nodular esférico libres de poros y sopladuras con una adecuada estanqueidad y la hermeticidad de las válvulas.
- Método de análisis y síntesis: se utilizó para identificar los factores principales -y sus características- que influyen en el fenómeno que se estudia, así como su interrelación. Se aplicó en la identificación de las etapas que intervienen en la aplicación de vibraciones durante la obtención de válvulas con grafito nodular esférico libres de poros y sopladuras con una adecuada estanqueidad y la hermeticidad de las válvulas.
- Método de la observación científica: se utilizó para observar las consecuencias de la disminución o no, de la cantidad de aleación nodulizante, aplicación de vibraciones



durante la obtención de válvulas con grafito nodular esférico libres de poros y sopladuras con una adecuada estanqueidad y la hermeticidad de las válvulas.

- Método de modelación: se aplicó al modelar el proceso usando modelos de válvulas establecidos por las normas internacionales ASTM, para la obtención de los fundidos.
- Método computacional: se utilizó durante la concepción y desarrollo de la aplicación informática para asistir el cálculo y diseño de los parámetros que intervienen en la tecnología (SolidWorks).
- Método experimental: permitió crear las condiciones o adecuar las existentes en el estudio de las propiedades y relaciones del objeto, y para modificar las condiciones bajo las cuales tiene lugar el fenómeno de forma planificada. Además, para verificar la hipótesis formulada.

### **Estructura de la tesis:**

El contenido de esta tesis se ha organizado en introducción, dos capítulos, conclusiones generales, recomendaciones, un apartado de referencias bibliográficas y un apartado de anexos.

En la «Introducción» se expone la motivación de la investigación, el objeto de estudio, el problema científico de la investigación, el objetivo, la hipótesis, la importancia y actualidad, del tema el campo de acción y los métodos de investigación utilizados.

En el Capítulo 1, « Antecedente y estado actual de la obtención de válvulas de fundición con grafito nodular esférico», se expone la revisión bibliográfica realizada, donde se analizan los aspectos esenciales relacionados. Se presenta un análisis de las tendencias actuales en la producción de válvulas con grafito nodular esférico, donde se examinan los aspectos esenciales relacionados con el uso de vibraciones en distintos

puntos del proceso de fusión y fundición de válvulas. Se muestran los antecedentes y experimentos previos en Cuba.

- En el Capítulo 2, «Tecnología de la obtención de válvulas con grafito nodular esférico libres de poros y sopladuras con una adecuada estanqueidad y la hermeticidad», se desarrolla la metodología, se exponen los procedimientos y métodos utilizados en el desarrollo de la investigación. Se realiza el análisis conclusivo de la factibilidad de aplicar el método vibratorio en la obtención de válvulas con grafito nodular esférico libres de poros y sopladuras con una adecuada estanqueidad y hermeticidad de las válvulas.
- En las «Conclusiones generales» se establecen las conclusiones de la investigación en correspondencia con el objetivo planteado. En las «Recomendaciones» se establecen aquellos aspectos que permitirán cumplimentar y ampliar la investigación desarrollada. En los «Anexos» se muestran datos complementarios esenciales para facilitar la comprensión de la investigación desarrollada.



## **CAPÍTULO 1. ANTECEDENTE Y ESTADO ACTUAL DE LA OBTENCIÓN DE VÁLVULAS DE FUNDICIÓN CON GRAFITO NODULAR ESFÉRICO.**

En este capítulo se realiza un análisis del estado del arte relativo a los métodos actuales de obtención de la válvula como un dispositivo mecánico con el cual se puede iniciar, detener o regular la circulación (paso) de líquidos o gases mediante una pieza movable que abre, cierra u obstruye en forma parcial uno o más orificios o conductos.

### **1.1. Válvulas y clasificaciones según su uso**

Distintos materiales de fabricación, diferentes diseños, aplicaciones y usos variables... las válvulas industriales pueden ser de muy diversos tipos. Los distintos sectores en los que son útiles demuestran que estos dispositivos son de enorme utilidad para cubrir infinidad de necesidades diferentes relacionadas con la gestión de fluidos.

Estos son los principales tipos de válvulas industriales que se emplean a día de hoy [Richard W. 2015]

- Válvulas de globo. Este dispositivo se emplea para el control del flujo de líquido en una canalización. Está constituida por un elemento de tipo disco móvil y un asiento de anillo estacionario. El cuerpo suele ser de forma esférica, aunque también tener forma de 'Y', 'T' o de globo, entre otros. Este tipo de válvulas industriales están diseñadas para ofrecer una completa estanqueidad, además de una alta efectividad de flujo. Destacan por su durabilidad, algo que está relacionado con el tipo de material en el que estén fabricadas (acero, hierro, bronce, etc.).

- Válvulas de esfera o esféricas. Llamadas también válvulas de bola, se caracterizan porque en su interior albergan una esfera con perforaciones mediante la cual se produce una para regulación del paso de los fluidos de las conducciones. En el momento en el que la válvula se encuentra en posición cerrada, la perforación se encuentra en posición perpendicular a la entrada y a la salida. Sin embargo, cuando la válvula de esfera se encuentra abierta, se produce una alineación entre la entrada y la

salida de la propia válvula. Para distinguir de manera sencilla la posición del dispositivo se utiliza una maneta, que sirve para maniobrar con ella. Se pueden accionar de manera manual o automática y puede tener cuerpo de una pieza, de dos o de tres. En Arco disponemos de la válvula de esfera doble eje Tajo Pro, que es innovación a nivel mundial.

- Válvula de compuerta. El procedimiento por el que abren el paso a un líquido es la subida de una cuchilla o compuerta que puede tener formas rectangulares o redondas. No se emplean para regular, sino para flujos de fluidos limpios ininterrumpidos. El proceso de apertura y cierre origina un desgaste por fricción y es lento.

-Válvulas de aguja. Estas válvulas facilitan la regulación eficiente de un líquido a alta presión para tuberías de tamaño pequeño. Cuentan con un eje de cierre con horma cónica que hace las veces de tapón en una abertura reducida. Estas válvulas son especialmente apreciadas en el sector hidráulico, en el que se utilizan en derivaciones, cortes de rutas y desvíos como bypass, dirigiendo el flujo a válvulas de bola o a válvulas de mariposa como paso previo a la introducción del líquido en turbinas o motores. Estas válvulas son inmunes a los contrastes fuertes entre distintas presiones y tienen un buen sellado por su diseño y estabilidad.

- Válvulas de mariposa. Útiles para permitir o impedir el paso del líquido. Se activan de manera automática o con actuadores. Estas válvulas se abren con una rotación de 90° del disco.

- Válvulas de retención. Llamadas también de antiretorno, check o uniflujo, cierran el paso del fluido en un sentido y permiten que circule en el contrario. Una de las ventajas que ofrece es que previene el descebado de bombas y los golpes de ariete. Existen varios tipos diferentes de válvulas de retención, como las válvulas de clapeta oscilante, las de muelle, las de retención de bola y las de válvula de pistón.



- Válvulas de regulación y control. Con ellas es posible gestionar cuánto caudal permitimos que circule por las conducciones, con lo que se pueden controlar valores como el nivel de fluido, la presión y la velocidad. Suelen complementarse con actuadores y también se usan con ellas termostatos. La velocidad del líquido se controla mediante un pistón que actúa en la vía anti-retorno.

- Válvulas de seguridad. Denominadas también 'de alivio', sirven para suavizar la presión cuando un líquido excede un máximo fijado previamente y de este modo impiden que se genere un exceso de presión que pueda dañar el sistema. Algunos dispositivos son configurables para reducir la presión en casos de aumento excesivo de temperatura y presión.

- Válvulas de guillotina. Estos dispositivos son comunes en la minería, las plantas químicas, la industria papelera, la industria alimentaria o en el tratamiento de aguas residuales. Se emplean para el manejo de fluidos cargados con sólidos en suspensión, en ocasiones con actuadores. Cuentan con una cuchilla que desciende sobre el asiento, impidiendo la obstrucción.

Básicamente, la elección de uno u otro tipo de válvulas de retención se basa en criterios del usuario. Dichos criterios pueden variar entre: conexiones a tuberías, materiales constructivos, menores pérdidas de carga, naturaleza del fluido (fluidos cargados, viscosos o sucios), mantenimientos, temperaturas y presiones [A. Campo López 2012].

Debido a su diseño y materiales, las válvulas pueden abrir y cerrar, conectar y desconectar, regular, modular o aislar una enorme serie de líquidos y gases, desde los más simples hasta los más corrosivos o tóxicos. Sus tamaños van desde unos milímetros hasta los 90 m o más de diámetro (aunque en tamaños grandes suelen llamarse compuertas). Pueden trabajar con presiones que van desde el vacío hasta más de 140 MPa (megapascales) y temperaturas desde las criogénicas hasta 1100 K

(kelvin). En algunas instalaciones se requiere un sellado absoluto; en otras, las fugas o escurrimientos no tienen importancia.



**Figura 1.** Partes de una Válvulas

La fundición con grafito nodular esférico puede superar al acero en cuanto a sus propiedades de fundición, menor densidad y menor costo de producción. La forma esférica del grafito en su microestructura, reduce la concentración de tensiones y, en consecuencia, el material es mucho más dúctil que la fundición gris. Suele utilizarse en válvulas que soportan elevadas cargas [Zhang, *et al.*, 2015].

La nodularidad, como característica, integra las propiedades mecánicas de resistencia y elongación relativa. Además, existe una fuerte correlación entre el deterioro de las propiedades mecánicas y la desviación de las esferas. Una elevada cantidad de esferas resulta deseable para algunas propiedades mecánicas y es uno de los beneficios de una inoculación efectiva en el proceso de producción de la fundición con grafito nodular esférico. Por otra parte, disponer de una mayor cantidad de esferas facilita la provisión de suficientes centros de nucleación para disolver el C a fin de precipitar el grafito antes que el  $Fe_3C$  en la fundición. [Astm-E2567-11, 2015; Davis, 1996; Metzaer y Seifert 2015].

Las propiedades relativas a la resistencia a la tracción y la elongación relativa disminuyen según se incrementa el porcentaje de grafito no nodular, así como, con el





decrecimiento en la cantidad de nódulos y su tamaño. De la misma forma, la dureza y la resistencia al impacto están influidas por la estructura de la matriz [Alhussein, *et al.*, 2014; Gonzaga, 2013; Gonzaga y Carrasquilla, 2005; Olsson, 2011; Ramadan, *et al.*, 2006]. Logística de la fundición con grafito nodular esférico y aspectos prácticos del vaciado

La fundición con grafito nodular esférico puede considerarse como “un acero que se obtiene con la misma facilidad que la fundición con grafito en láminas”. Desde el punto de vista de fluidez y facilidad de llenado de molde supera, incluso, a la fundición con grafito en láminas, y los sistemas de llenado son extrapolables. Sin embargo, en lo que concierne a los fenómenos de contracción, la fundición con grafito nodular esférico se comporta de forma más parecida a un acero, lo que hay que tener presente al calcular y diseñar los sistemas de alimentación.

Desde el punto de vista del material y del método de moldeo, para obtener buenas válvulas de fundición con grafito nodular esférico hay que elaborar adecuadamente los moldes, vigilando el tipo de arena, el grado de atacado, la calidad de las cajas de moldeo, entre otros aspectos [Andersson, 2015; Enríquez-Berciano, 2012].

## **1.2. Fundición con grafito nodular esférico por modificación “In mold”**

Uno de los desarrollos más modernos que se han producido en la nodularización de la fundición líquida ha sido el tratamiento de ésta a su entrada en el molde. Es un proceso sencillo en el que el agente nodulizante se coloca en una cámara especial de reacción intercalada en el sistema de colada. Este proceso está basado en dos premisas fundamentales [Enríquez-Berciano, 2012]:

- Partir de una fundición base desulfurada y limpia (menos de 0,010 % de S).
- La corriente líquida debe ponerse en contacto con el nodulizante, de forma tal que se produzca una reacción controlada a velocidad uniforme durante el tiempo de

llenado de la cavidad de molde, sin contaminación de residuos o inclusiones de escoria.

En algunos casos, especialmente aquellos donde el molde se elabora con arena aglutinada con bentonita en lugar de arena aglomerada con resinas, el sistema de colada y cámara de reacción se hacen en paquete de machos. En el caso de fabricación de válvulas grandes, de más de una tonelada de peso, hay que disponer dos o más cámaras de reacción que han de ser idénticas entre sí.

Las propiedades mecánicas de válvulas de fundición fabricadas según la modificación “In mold” son más o menos iguales que con otros procesos [Askeland, *et al.*, 2010]. Sin embargo, hay que tener presente que, a efectos prácticos cada pieza es una colada diferente, por lo que hay que realizar el control de grado de nodularización en todas y cada una de las válvulas. El ultrasonido parece la respuesta lógica a esta exigencia [Voigt, *et al.*, 2009].

En la obtención de la fundición con grafito nodular irregular por modificación “In mold”, el Cr causa la perlitización completa de la matriz para un 0,75 % de concentración de Cr para válvulas con un espesor de pared de 3 mm a 12 mm y con una concentración de 1,5 % para válvulas de espesor de 24 mm.

Según Davis, la modificación “In mold” [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 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. Por todas estas razones es el método seleccionado en la presente investigación.

### **1.3. Antecedentes tecnológicos en Cuba del uso de las vibraciones en el vertido de la fundición con grafito nodular esférico**

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, 2011a]. 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. Estos resultados obtenidos por Sánchez-Figueroa [Sánchez-Figueroa, *et al.*, 2015a; Sánchez-Figueroa, *et al.*, 2015b; Sánchez-Figueroa, *et al.*, 2016c; Sánchez-Figueroa, *et al.*, 2013d; Sánchez-Figueroa, *et al.*, 2013e; Sánchez-Figueroa, *et al.*, 2013g], así como de los investigadores ucranianos [Smirnov, *et al.*, 2002b; Smirnov, *et al.*, 2002a], sirven de antecedentes y permitieron al autor definir las variables independientes y sus niveles para la investigación actual.

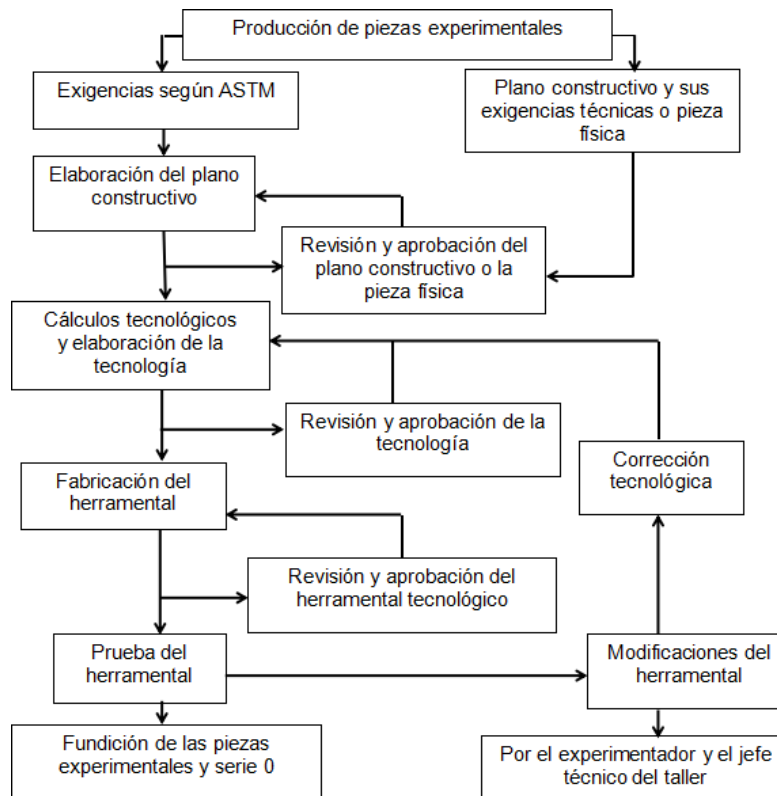
## **CAPÍTULO 2. TECNOLOGÍA PARA LA APLICACIÓN DE VIBRACIONES DURANTE LA OBTENCIÓN DE VÁLVULAS CON GRAFITO NODULAR ESFÉRICO LIBRES DE POROS Y SOPLADURAS**

En el presente capítulo se expone la Tecnología para la aplicación de vibraciones durante la obtención de válvulas con grafito nodular esférico libres de poros y sopladuras. Se aborda la metodología de cálculo de los parámetros para la obtención de la fundición con grafito nodular esférico modificado en el molde (“In mold”), la fundamentación del método vibratorio.

### **2.1 Organización metodológica de la investigación**

Teniendo en cuenta que la fundición con grafito nodular esférico modificado “In mold” se realiza para válvulas concretas (debido a la necesidad de realizar cálculos basados en el volumen de las mismas) y que se decidió trabajar directamente en los talleres, en la Figura 2.1 se muestra la organización del trabajo en la fábrica que funcionó como polígono.

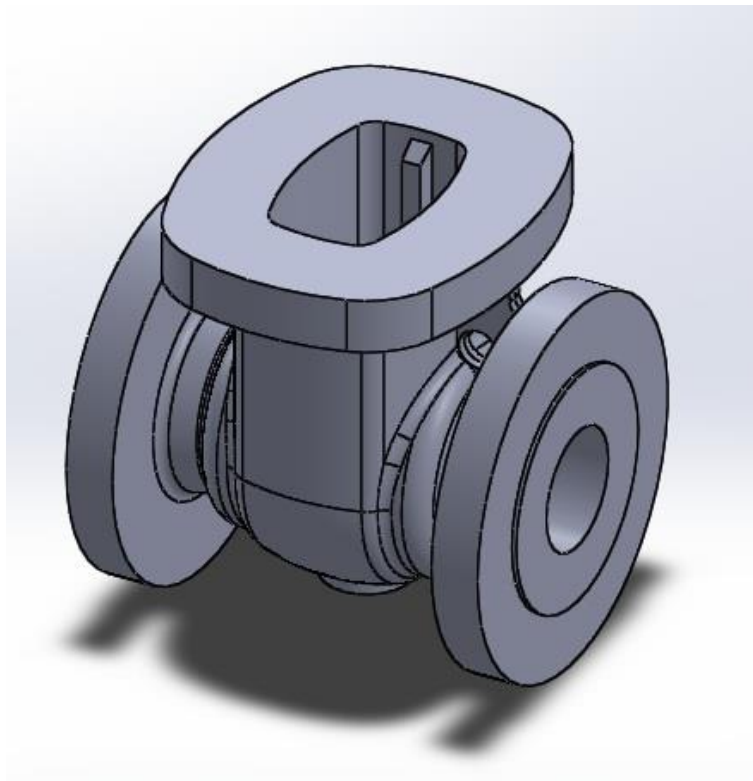




**Figura 2.1.** Organización productiva del taller de la Empresa Mecánica de Holguín.

## 2.2 Metodología de cálculo de los parámetros para la obtención de válvulas con grafito nodular esférico modificado “In mold”

Se decidió trabajar con válvulas normalizadas y fundidas, a fin de trabajar con la aleatoriedad necesaria a la investigación. Se seleccionó la fundición del cuerpo de válvula 2 (Figura 2.3) según norma ASTM A537-84. Para la extracción de válvulas a partir de los bloques fundidos se utilizó la norma internacional ASTM A536 – 84.

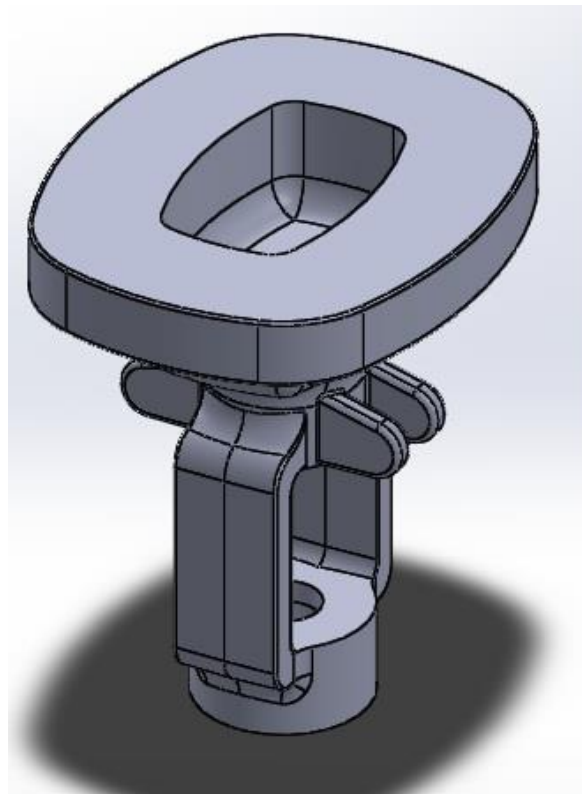


**Figura 2.3.** Fundición de cuerpo de válvula 2.

En una segueta mecánica modelo SB72 se extrajeron de cada cuña dos barras de dimensiones 25 mm x 22 mm x 175 mm. Posterior al corte y extracción de las barras mencionadas se le realizó centro en ambos extremos, en un taladro modelo 2H118. En un torno modelo 16K20 fueron cilindradas las barras a  $\varnothing$  16 mm y tronzadas a una longitud de 60 mm. El sobrante de cada barra fue tronzado a 17 mm para los ensayos de dureza y el análisis metalográfico.

Una vez tronzadas las barras, de cada cuña se obtuvieron seis piezas en bruto de  $\varnothing$ 16 x 60 mm en un torno horizontal 16K20. En este mismo torno se maquinaron las válvulas de tracción según el manual de instrucción del equipo de tracción (Figura 2.4).





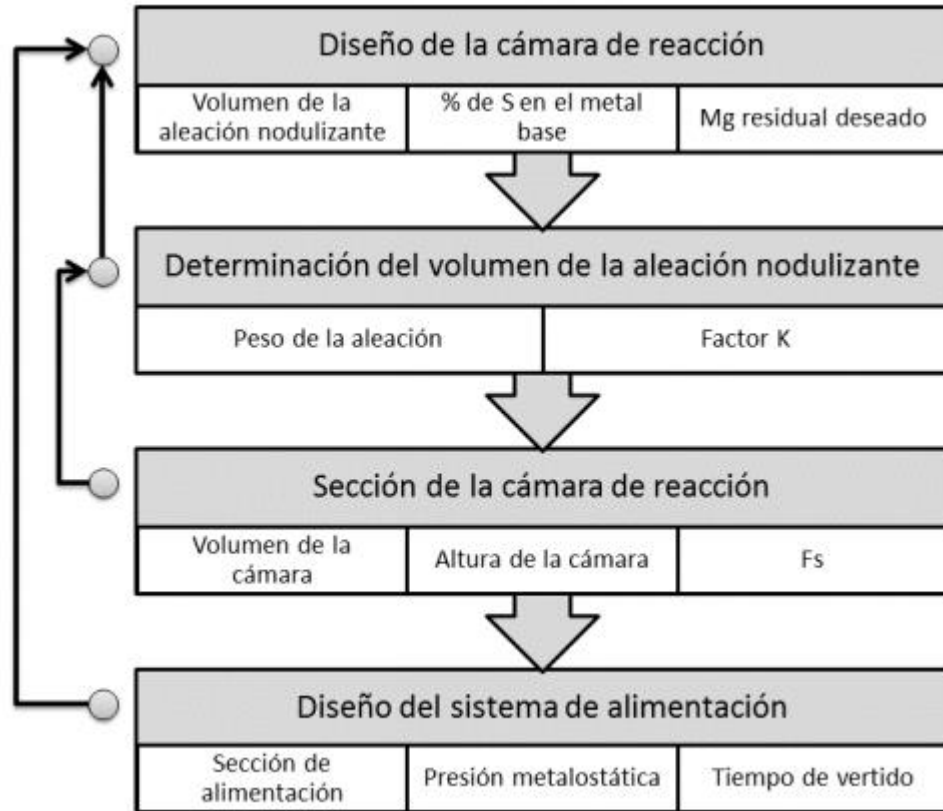
**Figura 2.4.** Tapa de válvula 2

A cada una se le determinó la resistencia a la tracción y la elongación relativa según la norma DIN-EN 10 002:91, en una máquina de ensayo universal con mando hidráulico modelo MP-100 KN de 1985.

Las válvulas para el ensayo de dureza y análisis metalográfico son trasladadas a la rectificadora plana modelo 3E7118, para rectificar hasta limpiar las dos caras planas y lograr una longitud de 16 mm.

### **2.3 Metodología de cálculo del molde de fundición para la modificación “In mold”**

Desde el punto de vista tecnológico, la metodología para el cálculo de los parámetros para la obtención de la fundición con grafito nodular esférico modificado “In mold” se puede expresar en cuatro etapas o momentos (Figura 2.5).



**Figura 2.5.** Etapas en el cálculo del diseño del sistema de alimentación para la modificación “In mold”

Del diseño adecuado de la cámara de reacción dependen otros parámetros que definen la formación del grafito nodular esférico durante la modificación, como son la velocidad de disolución de la aleación, el factor solución, el peso total de la colada, entre otros. El primer paso a seguir para la construcción de la cámara de reacción es conocer la masa de la aleación nodulizante que se obtiene según la ecuación (2.5).

$$M_{an} = \frac{M_{pacr} [(\% Scmb \cdot 0,76) + M_{grd}] \cdot 100}{(100 - PfMg) \cdot \% Mga} (kg) \quad (2.5)$$

La investigación considera una marca (ISO 400-12) con una  $\delta = 7,35 \text{ g/cm}^3$ . Utilizando una herramienta CAD, [Sánchez-Figueredo, 2007a; Sánchez-Figueredo, 2016; Sánchez-Figueredo y Pérez-Rodríguez, 2013b] se obtiene la masa de la pieza que





incluye la pérdida del metal en el sistema de alimentación y la cámara de reacción a partir de las propiedades físicas, lo que para el caso de la presente investigación resultó de 12,09 kg y aumenta con la disminución del contenido de grafito, con la disminución del contenido de Si y Al y con la disminución de la porosidad. Con el aumento de la temperatura, el peso específico de la fundición disminuye acorde con el coeficiente de dilatación térmica.

El peso de la pieza en bruto a modificar permite el cálculo de la cantidad de nodulizante requerido, ya que si es insuficiente no se obtiene una nodularidad satisfactoria en la pieza o ninguna. Por el contrario, si es excesiva se producen problemas de disolución incompleta del nodulizante, inclusiones de escorias y se reduce la eficiencia del proceso. A partir de la composición química del caldo metálico base que fue de C 3,57 %; Si 2,55 %; Mn 0,52 %; P 0,107 %; S 0,03 %, entonces, %Scmb = 0,03 %.

Para la aplicación de la modificación “In mold” es indispensable el conocimiento del nivel del Mg residual deseado, que debe quedar entre 0,035 % y 0,05 %, según [Enríquez-Berciano, 2012] para garantizar que todo el grafito nodular sea esférico. Para la presente investigación se toma 0,04 %, congruente con el porcentaje contenido en las coladas tradicionalmente realizadas en el taller de la Empresa Mecánica de Holguín donde se realizó esta investigación (entre un 0,036 % y un 0,04 %).

Las investigaciones de Davis [Davis, 1996] han demostrado que en la modificación “In mold” la eficiencia del Mg es igual o mayor al 80 % y en estudios realizados por Abasov [Smirnov, *et al.*, 2002a] se precisa que la pérdida por fusión en la modificación “In mold” es de un 20 %. Por tanto, en la presente investigación se asume que la pérdida por fusión del Mg (PfMg) es de un 20 %. Al utilizarse como aleación nodulizante el NODULAN II, se asume que el porcentaje de Mg en la aleación nodulizante es del 5 %. Sustituyendo estos valores en (2.5) se obtiene (2.6).

$$M_{an} = \frac{12,09[(0,03 \cdot 0,76) + 0,04] \cdot 100}{(100 - 20) \cdot 5} = \frac{75,9252}{400} = 0,189813 \text{ kg} = 189,98 \text{ g} \quad (2.6)$$

Conociendo de la expresión (2.6) la masa de la aleación nodulizante y la densidad de la aleación, se determina el volumen de la aleación nodulizante conforme a la expresión (2.7).

$$V_a = \frac{M_{an} \cdot 1000}{\rho} \quad \text{cm}^3 \quad (2.7)$$

La aleación nodulizante usada es el NODULAN II con una densidad de  $3,25 \text{ g/cm}^3$  para la granulometría de  $2,5 \text{ mm}$ . Sustituyendo en (2.7) se obtiene que  $V_a = 58,45 \text{ cm}^3$ . Luego se determina el volumen de la cámara de reacción, y para su cálculo se tiene en cuenta el volumen de la aleación nodulizante y  $K$ . Bajo las condiciones de la Empresa Mecánica de Holguín,  $K$  es de  $0,7$  [Batista-Cabrera y Ordoñez-Hernández, 1999; Sánchez-Figueredo, 2007a].

Conociendo que el volumen de la aleación nodulizante es de  $58,45 \text{ cm}^3$ , se determina  $V_c$  según la expresión (2.8). A continuación, se realiza el cálculo de  $M_c$  según (2.9).

$$V_c = \frac{V_a}{K} = \frac{58,45}{0,7} = 83,5 \text{ cm}^3 \quad (2.8)$$

$$M_c = V_c \cdot \rho_e = 83,5 \cdot 7,35 = 613,73 \text{ g} = 0,61 \text{ kg} \quad (2.9)$$

El siguiente paso consiste en encontrar  $A_s$ , que es otro factor importante en la nodularización, de acuerdo a la expresión (2.10).

$$A_s = \frac{V_v}{F_s} \quad (2.10)$$



Resultante de las investigaciones de Dunks [Dunks, 1976], se recomienda tomar  $F_s = 0,069 \text{ kg/s.cm}$ . La  $V_v$  se determina de acuerdo a la expresión (2.11).

$$V_v = \frac{M_{pacr}}{T_v} \quad (2.11)$$

El  $T_v$  se considera uno de los problemas más complejos de cálculo en válvulas de fundición gris, para ello se utiliza la expresión (2.12).  $St$  se obtiene de la Tabla 2.5.

$$T_v = St \sqrt{M_{pacr}} \quad (2.12)$$

El  $\delta_{mp}$  se calcula sumando todos los espesores de pared y dividiéndolo entre la cantidad de espesores de pared, como indica la expresión (2.13).

**Tabla 2.5.** Magnitud del coeficiente  $St$  para fundición gris.

$\delta_{mp}$ (mm)	$\leq 10$	10 - 20	20 - 40	$\geq 40$
$St$	1,0	1,3	1,5	1,7

$$\delta_{mp} = \frac{1+2+3\dots ne}{ne} \quad (2.13)$$

La investigación utiliza válvulas de fundición según la norma internacional ASTM A 536 – 84 (Reaprobada 1999), donde los espesores son 25 mm y 54 mm, utilizando estos datos, en (2.14) se obtiene el espesor medio de la pared.

$$\delta_{mp} = \frac{25+54}{2} = 39,5 \text{ mm} \quad (2.14)$$

Entonces, con un espesor medio de pared de 39,5 mm la magnitud del coeficiente  $St$  indicado en la Tabla 2.5 es de 1,5. Colocando estos valores en (2.12) se determina el  $T_v$  en (2.15).

$$T_v = 1,5\sqrt{12,09} = 5,22 \text{ s} \quad (2.15)$$

Sustituyendo en (2.11) se establece (2.16). Sustituyendo  $V_v$  en (2.10), se determina  $A_s$  según (2.17).

$$V_v = \frac{12,09}{5,22} = 2,42 \text{ kg / s} \quad (2.16)$$

$$A_s = \frac{2,42}{0,069} = 35,07 \text{ cm}^2 \quad (2.17)$$

Debido a la forma cilíndrica seleccionada para la cámara de reacción (Anexo 4), se determina el diámetro de la cámara de reacción por la expresión (2.18).

$$D_{cr} = 2 \cdot \sqrt{\frac{A_s}{\pi}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{35,07}{3,1416}} = 2 \cdot \sqrt{11,1631} = 6,68 \text{ cm} = 66,8 \text{ mm} \quad (2.18)$$

Una vez determinado el volumen de la aleación nodulizante y el área de solución de la cámara de reacción, se calcula  $H_a$  por la expresión (2.19).  $H_c$  define la nodularización del grafito y se calcula según la expresión (2.20).

$$H_a = \frac{V_a}{A_s} = \frac{58,45}{35,07} = 1,67 \text{ cm} \quad (2.19)$$

$$H_c = H_a + (1 - 2) = 1,67 + 1,5 = 3,17 \text{ cm} \quad (2.20)$$

Se calcula el  $V_c$  para el 10 % menos del valor tecnológico, según se expresa en (2.23).

$$V_{a(-10\%)} = \frac{170,99}{3,25} = 52,61 \text{ cm}^3 \quad (2.22)$$



$$Vc_{(-10\%)} = \frac{52,61}{0,7} = 75,16 \text{ cm}^3 \quad (2.23)$$

A continuación, se realiza el cálculo de la  $Mc_{(-10\%)}$  según (2.24).

$$Mc_{(-10\%)} = Vc \cdot \rho_e = 75,16 \cdot 7,35 = 552,43 \text{ g} = 0,55 \text{ kg} \quad (2.24)$$

El área de solución de la cámara de reacción se mantiene constante y de la expresión (2.25) se calcula  $Ha_{(-10\%)}$ . Según (2.26) se calcula  $Hc_{(-10\%)}$ .

$$Ha_{(-10\%)} = \frac{52,61}{35,07} = 1,5 \text{ cm} \quad (2.25)$$

$$Hc_{(-10\%)} = 1,5 + 1,5 = 3 \text{ cm} \quad (2.26)$$

El área de solución de la cámara de reacción se mantiene constante y  $Ha_{(-20\%)}$  se calcula según la expresión (2.31). El valor de  $Hc_{(-20\%)}$  se calcula según la expresión (2.32) (Anexo 4).

$$Ha_{(-20\%)} = \frac{46,76}{35,07} = 1,33 \text{ cm} \quad (2.31)$$

$$Hc_{(-20\%)} = 1,33 + 1,5 = 2,83 \text{ cm} \quad (2.32)$$

Esta investigación se realizó en dos escenarios:

Se realizó en el horno de cubilote de 700 mm de diámetro interior del taller de fundición de la Empresa Mecánica de Holguín, por ser este tipo de fusor el que propicia el caldo metálico menos indicado tecnológicamente para la obtención de fundición con grafito nodular esférico, debido al régimen térmico variable del metal y al alto contenido de azufre que es el principal demodificador del caldo metálico una vez nodulizado.

Además, constituye el proceso menos competitivo, para así demostrar con mayor fuerza criterial la hipótesis planteada para el cumplimiento del objetivo, para lo cual se desarrolla la siguiente metodología.

El cálculo y diseño del sistema de alimentación se muestra en el Anexo 5. Los materiales de carga y la fundición en el horno de cubilote se realizaron de acuerdo a los parámetros tecnológicos del cubilote vigente en el taller de fundición de metales ferrosos de la Empresa Mecánica de Holguín.

### 2.3.1 Cálculo y diseño del sistema de alimentación

#### Diseño del sistema de alimentación

El diseño del sistema de alimentación para la obtención de piezas con estructura de grafito nodular esférico debe ser lo mejor posible, porque influye en la velocidad de disolución de la aleación nodulizante, el factor solución, el diseño de la cámara de reacción, el peso total de la colada, etc. Se inicia con el cálculo del área mínima del sistema de alimentación utilizando la ecuación (1). La Tabla A5.1 relaciona el valor del coeficiente que incluye la resistencia del sistema de alimentación al paso de metal ( $\mu$ ). De la Tabla A.5.1 obtenemos que  $\mu$  para el caso es 0,32.

$$\sum F_a \approx \frac{M_{pacr}}{\mu \cdot T_v \cdot 0,31 \cdot \sqrt{H_m}} \quad (1)$$

Dónde:  $M_{pacr}$ : Masa de la pieza que incluye la pérdida del metal en el sistema de alimentación y cámara de reacción igual a 12,09 kg;  $\mu$ : Coeficiente que incluye la resistencia del sistema de alimentación al paso de metal y se determina por tablas;  $T_v$ : Tiempo de vertido en segundos que determinado en (14) es igual a 5,91seg;  $H_m$ : Presión metalostática media.



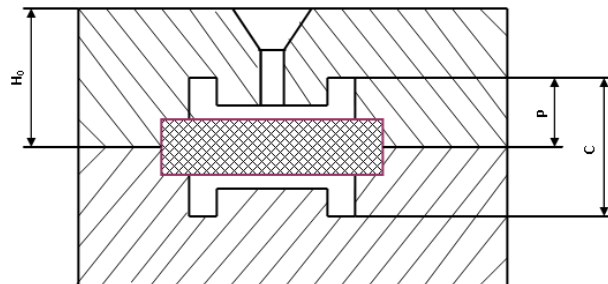
**Tabla A.5.1.** Coeficiente de resistencia del sistema de alimentación al paso de metal.

Carácter del molde	Alto	Medio	Bajo
Húmedo	0,25	0,32	0,42
Seco	0,30	0,38	0,50

La presión metalostática se calcula teniendo en cuenta los parámetros mostrados en la Figura A5.1.

La presión metalostática ( $H_m$ ) se determina por la expresión (2) cuando el vertido es por encima  $P = 0$  y  $H_m = H_0$ .

$$H_m = H_0 - \frac{P^2}{2C} \quad (2)$$



**Figura A5.1.** Dimensiones de  $H_0$  (altura de la caja superior),  $P$  (altura de la colada por encima del plano divisorio) y  $C$  (altura total de la colada).

Para el caso con vertido por sifón la presión metalostática se determina por (3).

$$H_m = H_0 - \frac{C}{2} \quad (3)$$

Dónde:  $H_m$ : Presión metalostática.

Para el caso de la investigación, la altura de la caja superior es de 200mm y la pieza se obtiene en la caja inferior ( $H_m = H_0 = 200 \text{ mm}$ ). La investigación utiliza la norma internacional ASTM A 536 – 84 (Reaprobada 1999). El modelo de las probetas de fundición se muestra en la Figura 2.3 (Capítulo 2).

Sustituyendo en (1), se determina el área mínima del sistema de alimentación en (4).

$$\sum F_a = \frac{12,09}{0,32 \cdot 5,22 \cdot 0,31 \cdot \sqrt{200}} = 1,65 \text{ mm} \quad (4)$$

Para evitar la introducción de escoria e inclusiones a la pieza, se establece una relación de los componentes del sistema de alimentación que cada elemento siguiente es 12% mayor que el anterior. De esta forma se logra que en cada elemento siguiente tenga mayor altura que el anterior, durante el flujo de metal queden atrapadas las suciedades en la parte superior de la sección, evitando así su paso a la parte posterior y así sucesivamente va sirviendo de trampa hasta lograr una pieza limpia (5).

$\Sigma$  F alimentador de la pieza: F alimentador de la cámara: F tragadero.

$$\text{Relación de Alimentación: } 1: 1,12: 1,134: 1,136 \quad (5)$$

Sustituyendo para una pieza se obtiene la sección de los alimentadores a la cámara y la pieza (6).

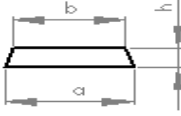
$$1,65: 1,85: 1,871 \quad (6)$$

En la Tabla A5.2 se incorporan las dimensiones de los elementos de alimentación. Para facilitar la sustentabilidad de la investigación en condiciones industriales se colocan tres piezas por molde, por lo que el área de la sección del tragadero se calcula según (7). En la Tabla A5.3 se incorporan los resultados obtenidos.





**Tabla A5.2.** Dimensiones de los alimentadores (mm).

Área de sección (cm <sup>2</sup> )										
	Altura h (mm)									
	3		5		8		12		16	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
0.3	11	9	7	5	-	-	-	-	-	-
0.5	18	16	11	9	8	5	-	-	-	-
0.7	25	22	16	12	10	8	-	-	-	-
0.9	31	29	19	17	12	10	-	-	-	-
1.0	35	32	21	19	13	10	-	-	-	-
1.2	41	39	25	22	15	12	-	-	-	-
1.4	48	45	29	26	18	15	12	9	-	-
1.6	61	59	37	34	<b>22</b>	<b>18</b>	15	12	12	9
1.8	64	62	41	37	<b>25</b>	<b>21</b>	17	13	13	11
2.2	75	72	45	42	31	25	19	16	15	12
2.5	85	82	51	49	31	28	21	18	16	13
3.0	95	92	57	54	39	36	25	22	19	16

$$F_{ir} = (3 \bullet 1,65) \bullet 1,36 = 5,6232 \text{ cm}^2 \quad (7)$$

**Tabla A5.3.** Dimensiones de los elementos de alimentación de la Tabla A5.2.

No	Elementos del sistema de alimentación	Dimensiones (mm)		
		a	b	h
1	F alimentador de la pieza	22	18	8
2	F alimentador de la cámara	25	21	8
3	F del tragadero	5,6232		

El área del tragadero regula la efectividad del llenado de los moldes y el resultado de la obtención de la estructura nodular esférica y se calcula el diámetro ( $D_{tr}$ ) según la expresión (8).

$$D_{tr} = 2 \cdot \sqrt{\frac{F_{tr}}{\pi}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{5,6232}{3,1416}} = 2,68 = 26,8 \text{ mm} \quad (8)$$

Dónde:  $D_{tr}$ : Diámetro del tragadero en mm;  $F_{tr}$ : sección del tragadero ( $\text{cm}^2$ ).

La taza de vertido ( $D_b$ ) garantiza el llenado continuo del tragadero y se obtiene por la relación (9).

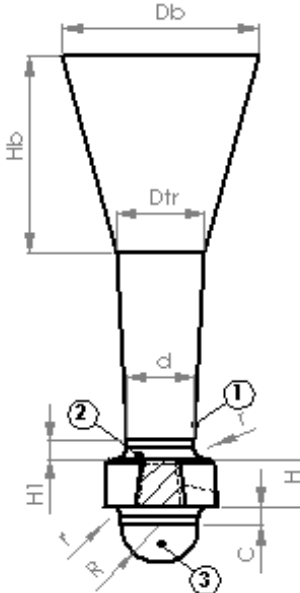
$$D_b = 3 \cdot D_{tr} = 3 \cdot 26,8 = 80,4 \text{ mm} \quad (9)$$

La altura de la taza ( $H_b$ ) es igual al diámetro de la taza, lo que implica que es igual a 80,4 mm. Las dimensiones del tragadero se seleccionan de la Tabla A5.4.



**Tabla A5.4.** Dimensiones del tragadero (1), fondo del tragadero (2) y la cazuela (3).

Ø del tragadero (mm)	Sección tragadero (cm <sup>2</sup> )	Dimensiones (mm)				
		R	C	r	H	H <sub>1</sub>
30	7,06	17,5	10	6	40	10
35	9,62	20,0	10	6	40	10
50	19,63	29,0	10	10	60	15
55	23,75	32,0	15	10	60	15
60	28,27	35,0	15	15	70	20
40	12,57	22,5	15	8	50	15
45	15,90	25,0	15	10	50	15
70	38,40	40,0	15	15	70	20
80	50,27	47,5	15	15	80	20
90	63,62	55,0	15	15	80	20



**OBSERVACIONES:** El ángulo de inclinación del tragadero y la cámara de reacción se toma desde 1:250 - 1:300 por cada lado

## 2.4 Tecnología para la elaboración de la fundición con grafito nodular esférico modificado “In mold”

Se le introdujo dentro a la cazuela precalentada, ya que se había realizado con ella vertidos anteriores, la cantidad precalculada de ferrosilicio 75 (FeSi75) con una granulometría de  $25 \text{ mm}^3$  promedio, también previamente secada y calentada a  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  -  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ , inoculante que aseguró la grafitización de la aleación. Luego a la cazuela se le vertió la aleación base, previamente desulfurada con una composición química según se indica en la Tabla 2.3 garantizando la temperatura de sangrado de  $1470 \text{ }^\circ\text{C}$  –  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ . Con ello se aseguró la temperatura de vertido de  $1425 \text{ }^\circ\text{C}$  –  $1450 \text{ }^\circ\text{C}$  a los correspondientes moldes, en cuya cámara de reacción se encontraba la masa de la aleación nodulizante, según cálculo para cada variante a estudiar de acuerdo a la matriz experimental (Tabla 2.2). La velocidad de vertido calculada fue de  $2,42 \text{ kg/s}$ .

Se elimina la escoria y se controla la temperatura del vertido a  $1450 \text{ }^\circ\text{C}$ , se conecta la plataforma vibratoria. Sobre la misma se coloca el molde con el trio de válvulas “Y” de  $25 \text{ mm} \times 75 \text{ mm} \times 175 \text{ mm}$  de acuerdo a la norma ASTM-01.02 A536-84 (1993), con una cámara de reacción cilíndrica en el semimolde superior (en la que está colocada la masa del nodulizante según la variante a experimentar (Tabla 2.2). Luego se regula la frecuencia a  $65 \text{ Hz}$  y se vierte el metal a una temperatura de  $1450 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Se repite la operación ascendiendo la frecuencia a  $70 \text{ Hz}$  y luego a  $75 \text{ Hz}$ , luego se realizan las actividades contempladas en el resumen de las instrucciones tecnológicas que aparecen el Anexo 6 y se toman las válvulas para el estudio de composición química. A continuación, se repiten todas las operaciones anteriores con una temperatura de vertido de  $1425 \text{ }^\circ\text{C}$  y se toman las válvulas para el estudio de composición química, completando el experimento según la matriz experimental mostrada en la Tabla 2.2. En cada caso se activó el vibrador electromagnético a la frecuencia indicada y con una amplitud constante de  $3 \text{ mm}$ . Durante el proceso de vertido se mantuvo el tratamiento vibratorio hasta el final de la solidificación.



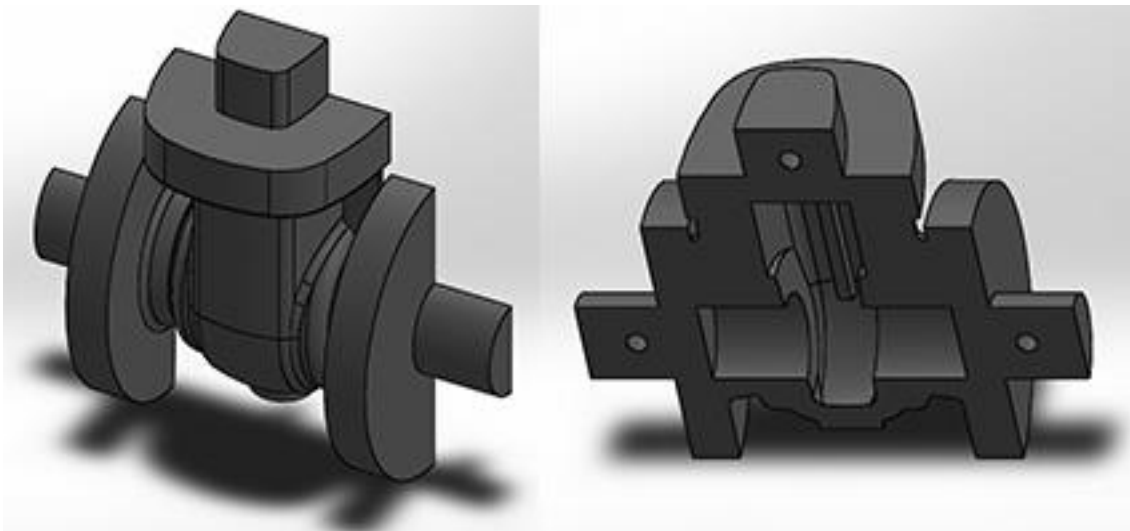
Se procedió a realizar las actividades de desmoldeo, acabado y la preparación de las muestras. Los lingotes obtenidos ya limpios se llevaron al proceso de obtención de válvulas para la medición de las propiedades metalográficas y mecánicas.

El proceso explicado se aplicó en las fusiones realizadas con ambos tipos de horno.

## **2.5 Vertido y solidificación de las válvulas**

Como el experimento se realizó en condiciones industriales, las válvulas fueron agrupadas en tríos, colocando en cada cámara la variante experimental de la masa de la aleación nodulizante correspondiente, es decir, 189,98 g, 170,99 g y 151,99 g. Los experimentos se realizaron bajo condiciones específicas y se cumplió con la instrucción tecnológica de fusión contemplada, en horno de cubilote de 700 mm de diámetro interior, con una composición de la carga de acuerdo a la norma de fusión planteada en el Anexo 3. Igual procedimiento se realizó en el caso del horno de inducción.

Los moldes se elaboraron con una mezcla de moldeo con la composición: 5 % de bentonita; 2 % de miel final de caña y el resto arena sílice, con una humedad entre 4,5 % y 5,5 %, una resistencia en verde mayor de 0,5 kgf/cm<sup>2</sup>. Con el objetivo de obtener mayor exactitud durante el proceso de moldeo, se empleó la tecnología modelo de placa porta (Figura 2.6).



**Figura 2.6.** Herramental tecnológico para la obtención de las válvulas.

En la Figura 2.6 se muestra en la imagen la sujeción del modelo del semimolde inferior a la placa porta modelo, sobre la cual, con la ayuda de las guías se coloca la caja inferior. Esta debe estar moldeada y se gira 180° junto con la placa y se coloca la caja superior con los insertos del herramental del semimolde superior según imagen. Luego se realiza el moldeo de la caja superior y se extrae el modelo y se obtiene el trío de válvulas. Se muestra la instrucción tecnológica de moldeo. El orden de vertido se realiza en forma aleatoria según la matriz del experimento para el vertido vibratorio que se observan en la Tabla 2.2.

## 2.6 Fundamentación del método vibratorio y construcción de la plataforma vibratoria

El método de vertido vibratorio consiste en colocar los moldes sobre una plataforma vibratoria (Figura 2.7) 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 válvulas; 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.



**Figura 2.7.** Plataforma vibratoria.

Este proceso debe 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.

Los aspectos señalados constituyen la base de la hipótesis científica de la presente investigación, que tiene como una de sus tareas más importantes determinar la influencia que ejerce el método vibratorio en las características metalográficas, de fundición, mecánicas y de la fundición con grafito nodular esférico.

Para el desarrollo de la investigación se construyó una plataforma vibratoria de dimensiones de 2 000 mm x 3 000 mm, soportada por muelles que permite la colocación de los moldes a fundir (Figura 2.7). Con el vibrador se aplica a la plataforma las vibraciones con frecuencias predeterminadas tecnológicamente (65 Hz, 70 Hz, 75 Hz), y en esta plataforma, se realiza el proceso de fundición de los moldes. Durante este proceso, las partículas de menor peso específico suben a la superficie (gases de

CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, escorias, entre otras) eliminando la efervescencia, es decir, calmando el llenado de los moldes; obteniendo fundidos libres de poros, sopladuras e inclusiones no metálicas. Además, se plantean efectos beneficiosos durante el vertido y nodularización de las fundiciones con grafito nodular esférico experimentadas, lo que constituye la hipótesis de la presente investigación.

## 2.7 Mantenimiento

En su principio, las válvulas son diseñadas para controlar la presión, resistir a la corrosión y otro tipo de daños que pueden ser ocasionados por las "actuaciones de la presión, pero también, deben recibir mantenimiento en su superficie, lo que prolongaría su vida útil, evitaría la corrosión, la formación de óxido y evitaría las fugas.

Para evitar situaciones problemáticas en la ejecución de los procesos en los que las válvulas están involucradas, se recomienda:

Realizar inspecciones regulares en todo el sistema, esto con el fin de detectar a tiempo cualquier situación que ponga en riesgo la seguridad y la eficiencia del sistema.

Diseñar y ejecutar programas de mantenimiento preventivo para el sistema con el objetivo de reemplazar piezas, limpiar superficies y realizar cualquier acción que asegure un funcionamiento en condiciones óptimas de la maquinaria.

Revisar que las válvulas de alta presión se encuentren debidamente engrasadas (de ser necesario) dado que, al acumularse líquidos en su interior, estas pueden llegar endurecerse o apretarse, lo que podría causar fallas y problemas en las instalaciones.

En caso de engrasar las válvulas, se recomienda utilizar engrasantes industriales especializados para dicha aplicación y realizarse durante cada periodo de mantenimiento programado para evitar posibles fallas.





## Calidad de las válvulas

Una de las dificultades tradicionales imputada como desventaja de la modificación “In mold” con respecto a la tecnología de obtención tradicional de las fundiciones con grafito nodular esférico, es la mala calidad tanto superficial como interior de las válvulas.

Lo anteriormente planteado está fundamentado en el proceso de disolución de la aleación nodulizante en la cámara de reacción dentro del molde, y posteriormente, el proceso de interacción entre el Mg presente y del caldo metálico de la aleación base. Esto provoca movimiento de la aleación líquida, gases que deben salir hacia las partes superiores del molde y luego por el sistema de alimentación y la permeabilidad del molde; partículas no metálicas que deben abandonar la cavidad del molde hacia las partes superiores que luego serán eliminadas en el proceso de limpieza de la pieza y retirada del sistema de alimentación. No siempre todas las partículas no metálicas logran llegar a las partes superiores del sistema de alimentación e incluso, partículas gaseosas quedan atrapadas durante el proceso de solidificación de las válvulas, trayendo como consecuencia una disminución de la calidad tanto interna como superficial de las válvulas.

En la presente investigación se aplicaron vibraciones durante el proceso de vertido y solidificación de las válvulas. Esto trajo como consecuencia, no solo los efectos metalúrgicos ya estudiados anteriormente durante el proceso de nucleación y nodularización, sino que contribuyó de manera positivamente a mejorar la disolución de la masa de aleación nodulizante en la cámara de reacción, así como a la interacción del Mg con la masa de la aleación base. La agitación creada permitió un movimiento ascendente más rápido de las inclusiones metálicas y gaseosas hacia las partes superiores del sistema de alimentación y su salida, por tanto, de la cavidad del molde que forma la pieza.

Asimismo, disminuyó la interacción de los gases con las paredes del molde, lo que facilita la formación de una interfase bien definida y limpia con menos cantidad de arenas acompañando a la aleación en el proceso de solidificación. Esto permite una menor tupición de los espacios intergranulares de la capa superficial del molde de arena-arcilla, facilitando la permeabilidad gaseosa. El propio movimiento provocado por las vibraciones trae como consecuencia un efecto de aceleración relativa del enfriamiento, una formación más rápida de la cáscara exterior de la pieza, al crear un efecto termodinámico beneficioso al proceso de solidificación. Como se observa en la Figura 3.20, la calidad superficial se hace evidente en comparación con las válvulas fundidas estáticamente, según la modificación “In mold” tradicional.



Pieza con vertido y solidificación aplicando vibraciones. 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

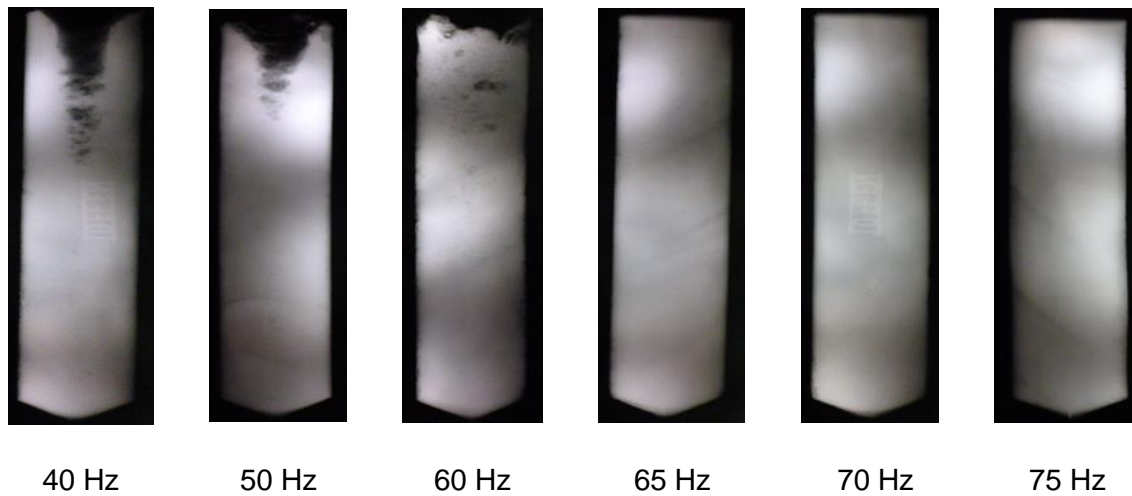
**Figura 3.20.** Pieza obtenida con vertido y solidificación aplicando vibraciones y modificación “In mold” (izquierda) y pieza obtenida con vertido estático (centro y derecha).

Las válvulas 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 válvulas 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 (Figura 3.20). Esto tiene una clara influencia sobre el proceso de limpieza, maquinado y sobre los costos de la fundición.

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

El estudio radiográfico realizado en investigaciones previas con un equipo portátil de Rayos X modelo Y.XPO 225 DO2, a las muestras obtenidas, pero con bajas frecuencias de vibraciones entre 40 y 60 Hz, sirvió como base de comparación a las realizadas usando vibraciones en los niveles estudiados en la presente investigación (65 Hz, 70 Hz, 75 Hz) y permite observar el comportamiento de los poros, sopladuras, inclusiones no metálicas y el rechupe que se obtiene en la modificación “In mold”. Con el vertido estático tradicional, se producen un significativo número de estos defectos internos, luego 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. Esto sirvió como uno de los criterios para seleccionar las frecuencias estudiadas en la presente investigación (Figura 3.21).

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.



**Figura 3.21.** Radiografías de las muestras obtenidas con vertido vibratorio (40 Hz-75 Hz).

## 2.8 Valoración económica

Tomando como base para la valoración económica la comparación del comportamiento del Rtg con la utilización del método estático y los resultados obtenidos utilizando el método vibratorio, permite cuantificar la factibilidad del fundido de hierro con grafito nodular esférico modificado “In mold” [Sánchez-Figueroa, 2007b; Sánchez-Figueroa, 2007d; Sánchez-Figueroa, *et al.*, 2016a].

El comportamiento del rendimiento metálico o la relación entre la masa neta de 700 kg de fundido y la masa bruta de 1 000 kg equivalente al 70 %, el índice de rechazo es del 5 % y la pérdida metálica se comporta hasta un 56 %, debido a la desmodificación de 550 kg de caldo metálico. Se obtiene un Rtg del 29,26 %, que actúan negativamente en los gastos totales y un costo de producción de 3 698,95 CUP/t de válvulas brutas de fundición con grafito nodular esférico y comercializado al precio de 3 901,68 CUP/t .

Esta variación negativa del Rtg ocasiona pérdidas económicas y eleva los costos de producción de fundidos con grafito nodular esférico modificados “In mold”. Esto



imposibilita su producción a escala industrial por su improductividad y altos costos de producción. En la Tabla 3.1 se realiza una comparación de los parámetros económicos entre la modificación “In mold” usando vertido 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” (Anexo 19).

La eliminación de la masa del metal lingoteado por desmodificación de 550 kg a solo 10 kg, con un entorno tecnológico de complejidad sencilla que garantiza la continuidad del proceso productivo, permite la obtención de fundición con grafito nodular esférico por el método vibratorio que garantiza la continuidad de la producción.

El método vibratorio de obtención de fundidos 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 y materiales a utilizar, lo que genera un ahorro del 39 % de portadores energéticos y también una disminución de los gastos y costos de producción en un 38,96 % del importe anterior con la utilización del vertido estático, como se muestra en la Tabla 3.2 [Sánchez-Figueroa, 2010a; Sánchez-Figueroa, 2010d].

**Tabla 3.1.** Comparación de los parámetros económicos de los métodos estático y vibratorio.

No	Denominación	Tipo de vertido		Diferencia
		Estático	Vibratorio	

1	Rendimiento tecnológico general (%)	29,26	75,08	45,82
2	Rendimiento metálico (%)	<b>70</b>	<b>77</b>	<b>7</b>
3	Masa neta del fundido (kg)	<b>700</b>	<b>770</b>	<b>70</b>
4	Índice de rechazo (%)	5	0,5	4,5
5	Masa total del rechazo (kg)	50	5	45
6	Pérdida metálica (%)	<b>56</b>	<b>2</b>	<b>54</b>
7	Masa del metal desmodificado y lingoteado (kg)	<b>550</b>	<b>10</b>	<b>540</b>
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	<b>Decremento promedio del costo y precio (%)</b>	<b>56,6</b>		



**Tabla 3.2.** Comparación de las normas de consumo de los métodos estático y vibratorio.

No	Portadores energéticos	Norma de consumo			Importe total (CUP)		
		Vertido estático	Vertido vibratorio	Ahorro	Vertido estático	Vertido vibratorio	Ahorro
1	Energía eléctrica (kWh)	861,244	335,630	525,614	87,85	34,23	53,62
2	Fuel oíl (t)	0,05126	0,01998	0,03128	11,00	4,29	6,71
3	Combustible diésel (l)	6,83527	2,66373	4,17154	3,42	1,33	2,09
4	Combustible gasolina (l)	2,48565	0,96867	1,51698	1,12	0,44	0,68
5	Carbón coque (t)	0,99111	0,38624	0,60487	193,67	75,48	118,19
6	Alcohol natural (l)	3,41763	1,33186	2,08577	1,25	0,49	0,76
7	Leña combustible (m <sup>3</sup> )	0,13671	0,05327	0,08344	1,17	0,52	0,65
8	Agua (m <sup>3</sup> )	6,83527	2,66373	4,17154	9,01	3,63	5,38
9	Oxígeno industrial (m <sup>3</sup> )	0,68353	0,26637	0,41716	0,52	0,21	0,31
Ahorro promedio (%)				<b>39</b>			<b>38,96</b>

Con el aumento del  $R_{tg}$  se disminuye la norma de consumo, lo que disminuye la cantidad de materias primas y materiales utilizadas en la producción de una tonelada de fundido, disminuyendo la emisión de gases nocivos a la atmósfera y la generación de desechos sólidos en un 40 % por toneladas de fundido [Sánchez-Figueroa, 2010d; Sánchez-Figueroa, 2012b].

## CONCLUSIONES GENERALES

1. Se evaluaron los procedimientos existentes de los métodos que intervienen en la producción de válvulas. Se elaboró la metodología de investigación y se crearon las condiciones experimentales para la utilización del método vibratorio.
2. En esta investigación se puede comprobar que las válvulas en bruto obtenidas con la aplicación de vibraciones durante el vertido y solidificación, mejora la calidad interna que queda evidenciada en las propiedades mecánicas de las válvulas.
3. La valoración económica realizada demostró que las válvulas de fundición con grafito nodular esférico producidas usando el método vibratorio producen 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 %).





## RECOMENDACIONES

Generalizar esta propuesta a todas las piezas que requieran estanqueidad y la no presencia de poros y sopladuras como bombas, artículos que trabajan con aire comprimido o líquidos a presión.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [Al-Ghonamy, *et al.*, 2012] A.I. Al-Ghonamy, M. Ramadan, N. Fathy, K.M. Hafez, y A.A. El-Wakil "Effect of graphite nodularity on mechanical properties of ductile iron for waterworks fittings and accessories," *International Journal of Civil & Environmental Engineering*, Vol. 10, No. 3, pp. 1-5, 2012.
- [Aristizábal, *et al.*, 2013] R.E. Aristizábal, P.A. Pérez, H.D. Machado, A.M. Pérez, y S. Katz, "Studies of a Quenched Cupola Part IV: Behavior of Coke," en *AFS Proceedings*, Schaumburg, IL USA, 2013, pp. 1-11, Url: [https://www.researchgate.net/publication/267343938\\_Studies\\_of\\_A\\_Quenched\\_Cupola\\_PART\\_IV\\_Coke\\_Behavior](https://www.researchgate.net/publication/267343938_Studies_of_A_Quenched_Cupola_PART_IV_Coke_Behavior).
- [Jacas, *et al.*, 2005] M. Jacas, M. Rodríguez, y U. Ordoñez "Modelación por Elementos Finitos como Método para la sustitución de válvulas de acero por Hierro Nodular," *Ingeniería Mecánica*, Vol. 8, No. 3, pp. 1-8, 2005, Url: [www.redalyc.org/articulo.oa?id=225118188005](http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=225118188005).
- [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: Техника, 1999.
- [Ordóñez-Hernández, *et al.*, 2015] U. Ordóñez-Hernández, S. Parada-de-la-Puente, C. Figueroa-Hernández, F.J. Mondelo-García, A. Barba-Pingarrón, y A. del-Castillo-Serpa "Caracterización de la capa de boruros formada durante la austenización de un hierro nodular austemperizado," *Ingeniería Mecánica*, Vol. 18, No. 1, pp. 71-79, 2015, Url: <http://www.ingenieriamecanica.cujae.edu.cu/index.php/revistaim/article/view/510/880>.
- [Asenjo, *et al.*, 2011a] I. Asenjo, P. Larrañaga, y J. Sertucha "Formación de grafito Chunky en válvulas de pequeño espesor fabricadas utilizando fundición de hierro con grafito esferoidal," *Revista de Metalurgia*, Vol. 47, No. 5, pp. 402-411, 2011a, Doi: <http://10.3989/revmetalm.1105>.
- [Gregorutti y Grau, 2014] R.W. Gregorutti y J.E. Grau "Mechanical properties of compacted graphite cast iron with different microstructures," *International Journal of Cast Metals Research*, Vol. 27, No. 5, pp. 275-281, 2014.
- [Carrillo-Castro, *et al.*, 2013] D. Carrillo-Castro, R.P. Sánchez-Figueroa, E. Navas-Medina, y R. Pérez-Rodríguez, "Influencia de la velocidad de vertido y el porcentaje de nodulizante en el número de nódulos y la dureza del hierro nodular," en *VI Conferencia Científica Internacional de la Universidad de Holguín*, Holguín, Cuba, 2013.
- [Bernard, 1964] Y. Bernard, "Method of producing nodular iron," 1964. Número de aplicación: 698950D. Espacenet. Canadá. Organización: N. C. Co. 1961-01-12. Patente No. CA698950A.



- [Brown-Boveri, 1964] Brown-Boveri, "Method of producing nodular cast iron from melted iron containing sulphur," 1964. Número de aplicación: B61570VIa. Espacenet. Suiza. Organización: B. B. C. Limited. 1964-06-29. Patente No. 947,676.
- [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.
- [Lester, 1961] C. Lester, "Method of producing nodular iron," 1961. Número de aplicación: 619126D. Espacenet. Canadá. Organización: D. M. I. Company. 1961-04-25. Patente No. CA619126A.
- [Batista-Cabrera, 1999] A. Batista-Cabrera "Utilización del magnesio como desulfurante y su influencia en las propiedades del Hierro con Grafito Esferoidal obtenida por el método "In-mold"," *Mundo Mecánico*, No. 2, 1999.
- [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.
- [Smirnov, et al., 1989] A.N. Smirnov, A.S. Plahotnyy, y Y.V. Kostenko, *El mecanismo para el mejoramiento del metal con tratamientos con vibroimpulsos (en ruso)* Vol. 4271947/31 Moscú: MKI B22D, 1989.
- [Dunks, 1976] C.M. Dunks "Mold Nodulizing and Continuous Stream Treatment Techniques as Operated in Europe," *Foundry Trade Journal*, No. 234, 1976.
- [Cenkebich, 1999] I. Cenkebich "Optimización de la obtención de válvulas de H.N.por el método "Ind-mould" (en ruso)," *Liteinoe. Proistbostba*, No. 12, pp. 13-14, 1999.
- [Batista-Cabrera, 2003] A. Batista-Cabrera, "Análisis y procedimientos para la obtención de hierro con hierro con grafito esferoidal por el método "In-mold" bajo las condiciones específicas de la industria en Cuba," *Ingeniería Mecánica*, Universidad de Holguín, Holguín, Tesis Doctoral 2003.
- [Batista-Cabrera y Ordóñez, 1999] A. Batista-Cabrera y U. Ordóñez "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.
- [Batista-Cabrera y Ordóñez, 2003] A. Batista-Cabrera y U. Ordóñez "Determinación de la granulometría del nodulizante y el parámetro de la cámara más adecuados para la obtención del hierro con grafito esferoidal por el método "In-mold"," *Ingeniería Mecánica*, Vol. 7, No. 2, pp. 81-86, 2003.
- [Chaikin, 1994] A.A. Chaikin "Refinado del hierro con grafito esferoidal modificado en el molde por medio de filtros cerámicos," *Liteinoe Proistbostba*, No. 4, 1994.
- [Sánchez-Figueredo, 2007a] R.P. Sánchez-Figueredo, "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 2007a.

- [Sánchez-Figuero, 2007b] R.P. Sánchez-Figuero, "El Rendimiento Tecnológico General como regulador del costo en las producciones de fundidos de hierro con grafito esferoidal por el método "In Mold", en *III Conferencia Científica Internacional de la Universidad de Holguín*, Holguín, Cuba, 2007b.
- [Sánchez-Figuero y Pérez-Rodríguez, 2008] R.P. Sánchez-Figuero y R. Pérez-Rodríguez, "Entorno tecnológico alternativo para la producción competitiva, sostenible y sustentable de fundidos de cuproaleaciones densos," en *V Jornada Científica de la Facultad de Ingeniería - Centro de Desarrollo de la Maquinaria Agrícola (CEDEMA)* Universidad de Holguín, 2008.
- [Sánchez-Figuero, 2009a] R.P. Sánchez-Figuero, "Tecnología para la manufactura competitiva de fundidos de aleaciones de Cobre," en *IV Conferencia Científica Internacional de la Universidad de Holguín*, Holguín, Cuba, 2009a.
- [Sánchez-Figuero, 2010a] R.P. Sánchez-Figuero, "Ahorro de portadores energéticos en la obtención de fundidos no ferrosos bajo las condiciones específicas de la industria metalúrgica cubana," en *6to. Taller Internacional de Energía y Medio Ambiente*, Holguín, Cuba, 2010a.
- [Sánchez-Figuero, 2002] R.P. Sánchez-Figuero "Perfil Fundición de Acero-Hierro de Holguín," *METANICA*, Vol. 4, 2002.
- [Sánchez-Figuero, 2007c] R.P. Sánchez-Figuero "Sistema de Trabajo 20 x 10," *METANICA*, Vol. 9, 2007c.
- [Sánchez-Figuero, 2007d] R.P. Sánchez-Figuero "Rendimiento Tecnológico General como regulador del costo de las válvulas fundidas de metales ferrosos y no ferrosos," *METANICA*, Vol. 9, 2007d.
- [Sánchez-Figuero, 2007e] R.P. Sánchez-Figuero "Horno multipropósito," *METANICA*, Vol. 9, 2007e.
- [Sánchez-Figuero, 2010b] R.P. Sánchez-Figuero "Tecnología de impacto medioambiental en procesos de fundición de metales," *METANICA*, Vol. 12, 2010b.
- [Sánchez-Figuero, 2010c] R.P. Sánchez-Figuero "Utilización de los desechos de vidrio en los procesos de fundición de metales ferrosos y no ferrosos," *METANICA*, Vol. 12, 2010c.
- [Sánchez-Figuero, 2010d] R.P. Sánchez-Figuero, "Ahorro de portadores energéticos en la fusión de metales no ferrosos," en *15 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura. VI Congreso Cubano de Ingeniería Mecánica y Metalurgia (CCIM 2010)*, La Habana, Cuba, 2010d.
- [Sánchez-Figuero, 2011a] R.P. Sánchez-Figuero, "Impacto medioambiental con la aplicación de tecnología alternativa de mezcla de moldeo de fundidos de metales ferrosos y no ferrosos," en *V Conferencia Científica Internacional de la Universidad de Holguín*, Holguín, Cuba, 2011a.
- [Sánchez-Figuero, 2011b] R.P. Sánchez-Figuero, "Tecnología de impacto medioambiental en proceso de fundición de metales," en *Taller regional sobre Medioambiente y desarrollo sostenible*, Holguín, Cuba, 2011b.



- [Sánchez-Figuero, 2012a] R.P. Sánchez-Figuero, "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, 2012a.
- [Sánchez-Figuero, 2012b] R.P. Sánchez-Figuero, "Tecnologías alternativas sostenibles y sustentables en procesos de fundición de metales ferrosos y no ferrosos," en *XXXIII Convención Panamericana de Ingenierías. Congreso medioambiente y desarrollo Humano. MADEHUMAN 2012*, La Habana, Cuba, 2012b.
- [Sánchez-Figuero, et al., 2013a] R.P. Sánchez-Figuero, A. García-Domínguez, y R. Pérez-Rodríguez, "Aumento de la competitividad, sostenibilidad y sustentabilidad de los fundidos metálicos por el método de vertido vibratorio," en *VII Conferencia Internacional de aprovechamiento de Recursos Minerales*, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Antonio Núñez Jiménez", 2013a.
- [Sánchez-Figuero, et al., 2013b] R.P. Sánchez-Figuero, F.H. Oviedo-Fierro, y V. M. Cárdenas, "Obtención de fundidos metálicos por el método de vertido dinámico," en *VI Conferencia Científica Internacional de la Universidad de Holguín*, Holguín, Cuba, 2013b.
- [Sánchez-Figuero, et al., 2013c] R.P. Sánchez-Figuero, F.H. Oviedo-Fierro, V. M. Cárdenas, y V.M. Arévalo-Suárez, "Obtención de fundidos con grafito esférico por el método de vertido dinámico," en *VI Conferencia Científica Internacional de la Universidad de Holguín*, Holguín, Cuba, 2013c.
- [Sánchez-Figuero, et al., 2013d] R.P. Sánchez-Figuero, F. H. Oviedo-Fierro, V. M. Cárdenas, y J. J. Sanzano-Tamayo, "Estudio de las propiedades mecánicas a tracción de los fundidos metálicos obtenidos por el método de vertido dinámico," en *VI Conferencia Científica Internacional de la Universidad de Holguín*, Holguín, Cuba, 2013d.
- [Sánchez-Figuero, et al., 2013e] R.P. Sánchez-Figuero, F. H. Oviedo-Fierro, y R. Lobaina-Silot, "Influencia en el comportamiento de la estructura metalográfica de los fundidos de metales obtenidos por el método de vertido dinámico," en *VI Conferencia Científica Internacional de la Universidad de Holguín*, Holguín, Cuba, 2013e.
- [Sánchez-Figuero y Pérez-Rodríguez, 2013a] R.P. Sánchez-Figuero y R. Pérez-Rodríguez, "Cálculo del costo y el precio de los fundidos a través del rendimiento tecnológico general," en *VI Conferencia Científica Internacional de la Universidad de Holguín*, Holguín, Cuba, 2013a.
- [Sánchez-Figuero y Pérez-Rodríguez, 2013b] R.P. Sánchez-Figuero y R. Pérez-Rodríguez, "Automatización del cálculo de los parámetros de obtención del hierro con grafito esférico por el método "In Mold"," en *VI Conferencia Científica Internacional de la Universidad de Holguín*, Holguín, Cuba, 2013b.
- [Sánchez-Figuero, et al., 2013f] R.P. Sánchez-Figuero, A. Ronda-Oro, y A. Torres-García, "Reducción de las mazarotas en las válvulas fundidas de acero el



- método de vertido dinámico," en *VI Conferencia Científica Internacional de la Universidad de Holguín*, Holguín, Cuba, 2013f.
- [Sánchez-Figuero, *et al.*, 2013g] R.P. Sánchez-Figuero, 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.
- [Sánchez-Figuero, *et al.*, 2013h] R.P. Sánchez-Figuero, 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, 2013h.
- [Sánchez-Figuero, *et al.*, 2015a] R.P. Sánchez-Figuero, A. García-Domínguez, y R. Pérez-Rodríguez, "Influencia del vertido vibratorio en la resistencia a la tracción del hierro con grafito esferoidal," en *VII Conferencia Científica Internacional de la Universidad de Holguín*, Holguín, Cuba, 2015a.
- [Sánchez-Figuero, *et al.*, 2016a] R.P. Sánchez-Figuero, A. García-Domínguez, R. Pérez-Rodríguez, y F.H. Oviedo-Fierro "Increase of the general technological yielding the securing of gray Iron with graphite spheroidal for the method of spilled vibratory," *International Journal of Science and Engineering Invention (IJSEI)*, Vol. 2, No. 3, pp. 1-8, 2016a, Url: <http://www.isij.in>.
- [Sánchez-Figuero, *et al.*, 2016b] R.P. Sánchez-Figuero, A. García-Domínguez, R. Pérez-Rodríguez, A.M. Quesada-Estrada, y I. Rodríguez-González, "Sustitución de la madera por poliesterol expandido en la producción de artículos fundidos de hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal utilizando el método de vertido vibratorio," en *2da. Convención Internacional CUBAINDUSTRIA 2016*, La Habana, Cuba, 2016b.
- [Sánchez-Figuero, *et al.*, 2015b] R.P. Sánchez-Figuero, 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, 2015b, Url: <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/download>, .
- [Sánchez-Figuero y Quesada-Estrada, 2015] R.P. Sánchez-Figuero y A.M. Quesada-Estrada, "Sustitución de la madera por poliesterol expandido en la producción de artículos fundidos de alta resistencia," en *Segunda Jornada Internacional de las Ingenierías Mecánica, Eléctrica, Industrial y ramas afines (JIMEI 2015)*, La Habana, Cuba, 2015.
- [Sánchez-Figuero y Pérez-Rodríguez, 2015] R.P. Sánchez-Figuero y R. Pérez-Rodríguez, "Dipro-InMold versión 1,0," 2015. Número de. CENDA 3156-2015, Cuba. Organización: Universidad de Holguín. Patente.
- [Sánchez-Figuero, *et al.*, 2016c] R.P. Sánchez-Figuero, 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, 2016c, Url: <http://www.ingenieriamecanica.cujae.edu.cu>.



- [Sánchez-Figuero, 2016] R.P. Sánchez-Figuero, *Tecnología CAD/CAM para fundidos con grafito esferoidal*: Editorial Académica Española, 2016, Url: <https://www.eae-publishing.com/catalog/details//store/es/book/978-3-659-70316-4/tecnolog%C3%ADa-cad-cam-para-fundidos-con-grafito-esferoidal>.
- [Sánchez-Figuero, et al., 2016d] R.P. Sánchez-Figuero, A. García-Domínguez, y R. Pérez-Rodríguez, "Aumento de la competitividad, sostenibilidad y sustentabilidad en la obtención de artículos metálicos por el método de vertido vibratorio," en *XXI Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*, Elche, Alicante, España, 2016d, Url: <http://dime.uhm.es.07/11/2016>.
- [Sánchez-Figuero, et al., 2017] R.P. Sánchez-Figuero, R. Pérez-Rodríguez, A. García-Domínguez, A.M. Quesada-Estrada, y L. Dumitrescu, "Obtención de fundidos de aleaciones no ferrosas por el método vibratorio," en *VIII Conferencia Científica Internacional de la Universidad de Holguín*, Hotel Atlántico Guardalavaca, Holguín, 26 al 28 de Abril, 2017, Url: <http://eventos.uho.edu.cu>.
- [Alhussein, et al., 2014] A. Alhussein, M. Risbet, A. Bastien, Chobaut. JP., D. Balloy, y J. Favergeon "Influence of silicon and addition elements on the mechanical behavior of ferritic ductile cast iron," *Materials Science and Engineering*, Vol. 605, pp. 222–228, 27 May 2014, 2014, Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2014.03.057>, Url: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509314003281>.
- [Stefanescu, et al., 2003] D.M. Stefanescu, R. Ruxanda, y L.P. Dix "The Metallurgy and Tensile Mechanical Properties of Thin Wall Spheroidal Graphite Irons," *International Journal of Cast Metals Research*, Vol. 16, No. 1-3, pp. 319-324, 2003.
- [Bigueievs, 1977] M. Bigueievs, *Metalurgia del Acero (en ruso)*: Metalurgia, 1977.
- [Chernov, 1950] D.K. Chernov, *Ciencia de los Materiales (en ruso)*: Metalurgisdat, 1950.
- [Sorelmetal, 1996] SORELMETAL, "A design engineer's digest of ductile iron - the cast iron of the past, present and future," en *Ductile iron marketing group digests(8th Edition)*: RTZ Iron and Titanium America, 1996.
- [Jinde, et al., 2013] Y. Jinde, P. Ye, S. Jinhua, Z. Zhangsong, S. Guoxiong, y C. Lixin, "Control method of as-cast condition heavy section ferrite-based nodular iron casting graphite nodule and matrix structure," 2013. Número de aplicación: CN20121453544 20121113. Espacenet. China. Organización: N. H. M. C. Ltd. 2013-04-03. Patente No. CN103014219 (A).
- [Qing, et al., 2016] J. Qing, V.L. Richards, y D.C. Van-Aken "Examination of Spheroidal Graphite Growth and Austenite Solidification in Ductile Iron," *Metallurgical and Materials Transactions A*, pp. 1-17, 2016, Doi: <http://10.1007/s11661-016-3783-1>.
- [Zhang, et al., 2015] L. Zhang, H. Zhao, y M. Zhu "Simulation of solidification microstructure of spheroidal graphite cast iron using a cellular automation method," *Acta Metallurgica (Chinese Edition)*, Vol. 51, No. 2, pp. 148-158, 2015.
- [Suárez-Sanabria y Fernández-Carrasquilla, 2006] A. Suárez-Sanabria y J. Fernández-Carrasquilla "Microestructura y propiedades mecánicas de una fundición

- esferoidal ferrítica en bruto de colada para su uso en válvulas de grandes dimensiones," *Revista de Metalurgia*, Vol. 42, No. 1, pp. 18-31, 2006, Doi: <http://dx.doi.org/10.3989/revmetalm.2006.v42.i1.3>, Url: <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/viewArticle/3>.
- [Genderevich, 1999] N.A. Genderevich "Elección del modificador para la obtención de Válvulas de hierro de alta resistencia modificado en el molde (en ruso)," *Liteinoe Proistbostba*, No. 2, pp. 16-17, 1999.
- [Luffe 1995] A. Luffe "Modificación del hierro con grafito esferoidal en el molde (en ruso)," en *Liteinoe Proistbostba*. Vol. 12, 1995.
- [Pina, et al., 2015] J.C. Pina, V.G. Kouznetsova, y M.G.D. Geers "Thermo mechanical analyses of heterogeneous materials with a strongly anisotropic phase: the case of cast iron," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 63, pp. 153-166, 2015.
- [Bockus y Zaldarys, 2011] S. Bockus y G. Zaldarys "Evaluation of producing technique factors affecting the matrix microstructure of as-cast ductile iron castings," *Metalurgija*, Vol. 50, No. 1, pp. 9-12, 2011.
- [Gorshkob, 1978] A.A. Gorshkob, *Acerca del formación del grafito esferoidal en las burbujas microscópicas durante la cristalización (en ruso)*: Bishaia, 1978.
- [Theuwissen, et al., 2016] K. Theuwissen, L. Laffont, M. Véron, y J. Lacaze "Crystallography of graphite spheroids in cast iron," *International Journal of Cast Metals Research*, Vol. 29, No. 1-2, pp. 12-16, 2016, Doi: <http://10.1080/13640461.2016.1142233>.
- [Callister, 2015] W.D. Callister, *Fundamentals of materials science and engineering: an interactive e text*, 2015, Url: <file:///C:/Users/pachoskie/Desktop/HiSi/CI/Callister>.
- [Sertucha, et al., 2012] J. Sertucha, J. Lacaze, J. Serrallach, R. Suárez, y F. Osuna "Effect of alloying on mechanical properties of as cast ferritic nodular cast irons," *Materials Science and Technology*, Vol. 28, No. 2, pp. 184-191, 2012, Doi: <http://10.1179/1743284711Y.0000000014>, Url: [http://oatao.univ-toulouse.fr/8770/1/Sertucha\\_8770.pdf](http://oatao.univ-toulouse.fr/8770/1/Sertucha_8770.pdf).
- [Alexandor, 1988] N.H. Alexandor "Control del estado del metal Líquido para la obtención de hierro con grafito esferoidal (en ruso)," *Liteinoe Proistbostba*, No. 3, 1988.
- [Vada, et al., 2014] J. Vada, T. Kajahara, T. Sugimoto, y T. Tanaka, "Nodular iron and method of its manufacturing," 2014. Número de aplicación: 20141102/02. Espacenet. Rusia. Organización: K. Z. Korporejshn. 2014-03-28. Patente No. RU2551724C1.
- [Batista-Cabrera, 2000] A. Batista-Cabrera "Influencia del azufre en el rendimiento de las válvulas de hierro nodular obtenida por el método "Ind- Mold"," *Mundo Mecánico*, No. 6, 2000.
- [Stefanescu, 2006] D.M. Stefanescu "Microstructure Evolution during the Solidification of Steel," *ISIJ International*, Vol. 46, No. 6, pp. 786-794, 2006.





- [Takeda, *et al.*, 2008] H. Takeda, K. Asano, y H. Yoneda "Effect of bismuth on refinement of graphite in thin wall spheroidal graphite cast iron," *International Journal of Cast Metals Research*, Vol. 21, No. 1-4, pp. 81-85, 2008, Doi: <http://10.1179/136404608X361710>.
- [Boonmee y Stefanescu, 2011] S. Boonmee y D.M. Stefanescu "The Mechanism of Formation of Casting Skin in CG Iron and its Effect on Tensile Properties," *Key Engineering Materials*, Vol. 457, pp. 11-16, 2011, Doi: <http://10.4028/www.scientific.net/KEM.457.11>.
- [Diao, *et al.*, 2010] X.G. Diao, Z.L. Ning, F.Y. Cao, S.Z. Ren, y J.F. Sun "Microstructure evolution of heavy section ductile iron," *Advanced Materials Research*, Vol. 97-101, pp. 1020-1023, 2010, Doi: <http://10.4028/www.scientific.net/AMR.97-101.1020>, Url: <http://www.scientific.net/AMR.97-101.1020>.
- [Hervas-Dobon, 2013] I. Hervas-Dobon, "Contribution à l'étude des mécanismes d'endommagement des fontes ferritiques à graphite sphéroïdal," Université de Caen Basse-Normandie, Tesis Doctoral 2013.
- [Ilarduya, 2017] Ilarduya, "Nodulizantes/Inoculantes," ([http://www.ilarduya.com/productos\\_para\\_la\\_fundicion/nodulizantes\\_inoculantes/index.html](http://www.ilarduya.com/productos_para_la_fundicion/nodulizantes_inoculantes/index.html)), 2017. 2017-01-23.
- [Astm-E2567-11, 2015] ASTM-E2567-11, "ASTM E2567-11. Standard test method for determining nodularity and nodule count in ductile iron using image analysis," 2015.
- [Davis, 1996] J.R. Davis, *ASM specialty handbook: Cast irons*: ASM International, 1996.
- [Metzaer y Seifert 2015] M. Metzaer y T. Seifert "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*, Vol. 66, pp. 194-206, 2015.
- [Guliaev, 1976] A.P. Guliaev, *Metalografía* Vol. I Moscú, Russia: Mir, 1976.
- [Stefanescu, 2005a] D.M. Stefanescu "Solidification and modeling of cast iron—A short history of the defining moments," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 413–414, pp. 322–333, 2005a, Doi: <http://10.1016/j.msea.2005.08.18>.
- [Stefanescu, 2005b] D.M. Stefanescu "Discussion on 'New method for rapid evaluation of spheroidisation and inoculation grade of hypereutectic cast iron'," *International Journal of Cast Metals Research*, Vol. 18, No. 1, pp. 63-64, 2005b, Doi: <http://10.1179/136404605225022820>.
- [Gonzaga, 2013] R.A. Gonzaga "Influence of ferrite and pearlite content on mechanical properties of ductile cast irons," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 567, pp. 1-8, 2013.
- [Gonzaga y Carrasquilla, 2005] R.A. Gonzaga y J.F. Carrasquilla "Influence of an appropriate balance of the alloying elements on microstructure and on mechanical properties of nodular cast iron," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 162-163, pp. 293-297, 2005, Doi:

- <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.040>,  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013605000932>. Url:
- [Dasgupta, *et al.*, 2011] R.K. Dasgupta, D.K. Mondal, A.K. Chakrabarti, y A.C. Ganguli "Microstructure and mechanical properties of as cast ductile irons alloyed with manganese and copper," *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 21, No. 8, pp. 1728-1736, 2011, Doi: <http://10.1007/s11665-011-0058-2>, Url: <http://link.springer.com/article/10.1007/s11665-011-0058-2>.
- [Riposan, *et al.*, 2007] I Riposan, M. Chisamera, y S. Stan "Influencing factors on as-cast and heat treated 400-18 ductile iron grade characteristics," *China Foundry*, Vol. 4, No. 4, pp. 300-303, 2007.
- [Lacaze, *et al.*, 2016] J. Lacaze, K. Theuwissen, L. Laffont, y M. Véron "Misorientations in spheroidal graphite: some new insights about spheroidal graphite growth in cast irons," *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 117, pp. 1-6, 2016, Doi: <http://iopscience.iop.org/1757-899X/117/1/012024>.
- [Serrallach, *et al.*, 2011] J. Serrallach, J. Lacaze, Sertucha. J., R. Suárez, y A. Monzon "Effect of selected alloying elements on mechanical properties of pearlitic nodular cast irons," *Key Engineering Materials*, Vol. 457, pp. 361-366, 2011, Doi: <http://10.4028/www.scientific.net/KEM.457.361>.
- [Lacaze, *et al.*, 2003] J. Lacaze, G. Torres-Camacho, y C. Bak "Microsegregation in mottled spheroidal graphite cast iron," *International Journal of Cast Metals Research*, Vol. 16, No. 1-3, pp. 167-172, 2003, Doi: <http://10.1080/13640461.2003.11819577>.
- [Muhmond y Fredriksson, 2014] H.M. Muhmond y H. Fredriksson "Graphite growth morphologies in cast iron," *Materials Science Forum*, Vol. 790-791, pp. 458-463, 2014.
- [Stefanescu, 2007a] D.M. Stefanescu "30 Years of Modeling of Microstructure Evolution during Casting Solidification," *Advanced Materials Research*, Vol. 23, pp. 9-16, 2007a.
- [Stefanescu, *et al.*, 2017] D.M. Stefanescu, G. Alonso, P. Larranaga, E. De la Fuente, y R. Suarez "Reexamination of crystal growth theory of graphite in iron-carbon alloys," *Acta Materialia*, Vol. 139, pp. 109-121, 2017.
- [Skaland, 2001] T. Skaland "A new approach to ductile Iron inoculation," *American Foundry Society*, pp. 1-12, 2001.
- [Skaland, 2005] T. Skaland, "Nucleation mechanisms in ductile iron," en *AFS Cast Iron Inoculation Conference*, Schaumburg, Illinois, 2005, pp. 14-30.
- [Skaland, 2003] T. Skaland "Ductile iron shrinkage control through graphite nucleation and growth," *International Journal of Cast Metals Research*, Vol. 16, No. 1, pp. 11-16, 2003.
- [Riposan, *et al.*, 2003] I. Riposan, M. Chisamera, R. Kelley, M. Barstow, y R.L. Naro "Magnesiumsulfur relationships in ductile and compacted graphite cast irons as influenced by late sulfur additions," *AFS Transactions*, Vol. 111, No. 03-93, pp. 869-883, 2003.



- [Stefanescu, *et al.*, 2016a] D.M. Stefanescu, G. Alonso, P. Larranaga, E. de la Fuente, y R. Suarez "On the crystallization of graphite from liquid iron-carbon-silicon melts," *Acta Materialia*, Vol. 107, pp. 102-126, 2016a, Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2016.01.047>.
- [Nakae, *et al.*, 2011] H. Nakae, M. Fukami, T. Kitazawa, y Y. Zou "Influence of Ci, Ce, Sb and Sn on chunky graphite formation," *China Foundry*, Vol. 8, No. 1, pp. 96-100, 2011.
- [Kallbom, *et al.*, 2005] R. Kallbom, K. Hamberg, M. Wessan, y L. Bjarkegren "On the solidification sequence of ductile iron castings containing chunky graphite," *Materials Science and Engineering*, Vol. 413-414, pp. 346-351, 2005, Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2005.08.210>, Url: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509305010014>.
- [Stefanescu, *et al.*, 2016b] D.M. Stefanescu, G. Alonso, P. Larranaga, y R. Suarez "On the stable eutectic solidification of iron-carbon-silicon alloys," *Acta Materialia*, Vol. 103, pp. 103-114, 2016b, Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2015.09.043>.
- [Stefanescu, 2007b] D.M. Stefanescu "Modeling of cast iron solidification - The defining moments," *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 38A, pp. 1433-1447, 2007b, Doi: <http://10.1007/s11661-007-9173-y>.
- [Larrañaga, *et al.*, 2009] P. Larrañaga, I. Asenjo, J. Sertucha, R. Suárez, I. Ferrer, y J. Lacaze "Effect of antimony and cerium on the formation of chunky graphite during solidification of heavy-section castings of near-eutectic spheroidal graphite irons," *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 40, No. 3, pp. 654-661, 2009, Doi: <http://10.1007/s11661-008-9731-y>, Url: <http://link.springer.com/article/10.1007/s11661-008-9731-y>.
- [Ferro, *et al.*, 2013] P. Ferro, A. Fabrizi, R. Cervo, y C. Carollo "Effect of inoculant containing rare earth metals and bismuth on microstructure and mechanical properties of heavy-section near-eutectic ductile iron castings," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 213, No. 9, pp. 1601-1608, 2013, Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.03.012>, Url: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013613001027>.
- [Zhe, *et al.*, 2012] L. Zhe, C. Weiping, y D. Yu "Influence of cooling rate and antimony addition content on graphite morphology and mechanical properties of a ductile iron," *China foundry*, Vol. 9, No. 2, pp. 114-118, 2012.
- [Shen, *et al.*, 1995] X.P. Shen, S.J. Harris, y B. Noble "Influence of small vanadium and cobalt additions on microstructure and properties of ductile iron," *Materials Science and Technology*, Vol. 11, No. 9, pp. 893-900, 1995, Doi: <http://dx.doi.org/10.1179/mst.1995.11.9.893>.
- [Cheng-Hsun, *et al.*, 2007] H. Cheng-Hsun, C. Ming-Li, y H. Chia-Jung "Microstructure and mechanical properties of 4% cobalt and nickel alloyed ductile irons," *Materials Science and Engineering*, Vol. 444, No. 1-2, pp. 339-346, 2007, Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2006.09.027>, Url: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509306019952>.

- [Yazdani, *et al.*, 2001] S. Yazdani, H. Bayati, y R. Elliott "The influence of cobalt on the austempering reaction in ductile cast iron," *International Journal of Cast Metals Research*, Vol. 13, No. 6, pp. 317-326, 2001, Doi: <http://dx.doi.org/10.1080/13640461.2001.11819413>.
- [Olsson, 2011] A. Olsson "Fatigue strength of truck components in cast iron," 2011.
- [Ramadan, *et al.*, 2006] M. Ramadan, A.A. Nofal, I. Elmahalawi, y R. Abdel-Karim "Comparison of austempering transformation in spheroidal graphite and compacted graphite cast irons," *International Journal of Cast Metals Research*, Vol. 19, No. 3, pp. 151-155, 2006, Doi: <http://10.1179/136404606225023363>.
- [Fras, *et al.*, 2007] E. Fras, M. Górný, y M. Kawalec "Effect of small additions of vanadium and niobium on structure and mechanical properties of ductile iron," *Archives of Foundry Engineering*, Vol. 7, No. 1, pp. 89-92, 2007, Url: [www.afe.polsl.pl/index.php/en/22/effect-of-small-additions-of-vanadium-and-niobium-on-structure-and-mechanical-properties-of-ductile-iron.pdf](http://www.afe.polsl.pl/index.php/en/22/effect-of-small-additions-of-vanadium-and-niobium-on-structure-and-mechanical-properties-of-ductile-iron.pdf).
- [Hiratsuka, *et al.*, 2003] S. Hiratsuka, H. Horie, T. Kowata, K. Koike, y K. Shimizu "Influence of steel scrap on microstructure and mechanical properties of spheroidal graphite cast iron," *Materials Transactions*, Vol. 44, No. 7, pp. 1419-1424, 2003, Doi: <http://doi.org/10.2320/matertrans.44.1419>, Url: [https://www.istage.jst.go.jp/article/matertrans/44/7/44\\_7\\_1419/article](https://www.istage.jst.go.jp/article/matertrans/44/7/44_7_1419/article).
- [Asenjo, *et al.*, 2007] I. Asenjo, P. Larranaga, J. Sertucha, R. Suárez, J.M. Gómez, y I. Ferrer "Effect of mould inoculation on formation of chunky graphite in heavy section spheroidal graphite cast iron parts," *International Journal of Cast Metals Research*, Vol. 20, No. 6, pp. 319-324, 2007, Url: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1179/136404608X286138>.
- [Asenjo, *et al.*, 2011b] I. Asenjo, P. Larrañaga, J. Garay, y J. Sertucha "Influencia de la composición química de diferentes chatarras de acero sobre las propiedades mecánicas de la fundición con grafito esferoidal," *Revista de Metalurgia*, Vol. 47, No. 4, pp. 307-318, 2011b, Doi: <http://10.3989/revmetalm.1044>.
- [Sertucha, *et al.*, 2013] J. Sertucha, J. Lacaze, S. Armendariz, y P. Larrañaga "Statistical analysis of the influence of some trace elements on chunky graphite formation in heavy section nodular iron castings," *Metallurgical and Materials*, Vol. 44 pp. 1159–1162, 2013.
- [Stets, *et al.*, 2013] W. Stets, H. Lablich, I. Giebereitechnik, G. Gassner, y P. Schumacher "Solution strengthened ferritic ductile cast irons-properties, production and application," *International Journal of Metalcasting*, Vol. 8, No. 2, pp. 35-40, 2013.
- [Borsato, *et al.*, 2016] T. Borsato, F. Berto, P. Ferro, y C. Carollo "Effect of in-mould inoculant composition on microstructure and fatigue behaviour of heavy section ductile iron castings," *Procedia Structural Integrity*, Vol. 2, pp. 3150–3157, 2016, Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.393>, Url: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321616304127>.



- [Cabanne y Gagné, 2010] P.M. Cabanne y M. Gagné, "Inoculation of ductile iron- why and when? Suggestions for Ductile Iron Production," en *Sorelmetal Technical Services*, 2010, pp. 1-4.
- [Ecs, 2011] ECS, "EN 1563:2011 - Founding - Spheroidal graphite cast irons," European Committee for Standardization, 2011.
- [Song, *et al.*, 2014] L. Song, E. Guo, y C. Tan "Effect of Bi on graphite morphology and mechanical properties of heavy section ductile cast iron," *China Foundry* Vol. 11, No. 2, pp. 125–131, 2014, Url: <http://www.foundryworld.com/uploadfile/2014082757876925.pdf>.
- [Song, *et al.*, 2015] L. Song, E. Guo, L. Wang, y D. Liu "Effects of silicon on mechanical properties and fracture toughness of heavy-section ductile cast iron," *Metals*, Vol. 5, No. 1, pp. 150-161, 2015, Doi: <http://10.3390/met5010150>.
- [Wessen y Svensson, 1996] M. Wessen y I.L. Svensson "Modeling of Ferrite Growth in Nodular Cast Iron," *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 27A, pp. 2209-2220, 1996.
- [Xing, *et al.*, 2015] W. Xing, W. Meixi, S. Xueyong, Y. Xingyi, y C. Bailin, "Method of controlling graphite shape of core of large-cross-section silicon solid solution strengthening ferritic nodular cast iron," 2015. Número de aplicación: CN20151422672 20150717. Espacenet. China. Organización: J. J. W. E. T. C. Ltd. 2015-11-18. Patente No. CN105063467 (A).
- [Enríquez-Berciano, 2012] J.L. Enríquez-Berciano, "Fabricación de fundición nodular," U. P. d. Madrid, Ed. Madrid, España, 2012, p. 84.
- [Lekakh, 2015] S.N. Lekakh "High strength ductile iron produced by the engineered cooling: process concept," *International Journal of Metalcasting*, Vol. 9, No. 2, pp. 21-30, 2015, Doi: <http://10.1007/BF03355612>.
- [Lin, *et al.*, 2003] H. Lin, T. Lui, y L. Chen "Effect of silicon content on intergranular embrittlement of ferritic spheroidal graphite cast iron suffered from cyclic heating," *Materials Transactions*, Vol. 44, No. 1, pp. 173-180, 2003.
- [Gundlach, *et al.*, 2015] R. Gundlach, M. Meyer, y L. Winardi "Influence of Mn and S on the Properties of Cast Iron. Part III - Testing and Analysis," *International Journal of Metalcasting*, Vol. 9, No. 2, pp. 69-82, 2015, Url: <https://afsinc.s3.amazonaws.com/Documents/IJMC/Spring%202015/Influence-Mn-S-Properties-Cast-Iron.pdf>.
- [Elmabrouk, *et al.*, 2012] O. Elmabrouk, O.M. Erfan, y A. Kalkanli "The effect of magnisium to sulfur ratio on the graphite morphology of graphite cast iron produced at different section thicknesses," *Advanced Materials Research*, Vol. 383-390, pp. 5880-5885, 2012, Doi: <http://10.4028/www.scientific.net/AMR.383-390.5880>.
- [Stefanescu, *et al.*, 2009] D.M. Stefanescu, S. Wills, y J. Massone "Quantification of Casting Skin in Ductile and Compacted Graphite Irons and Its Effect on Tensile Properties," *AFS Transactions*, pp. 1-20, 2009, Doi: <http://10.1007/BF03355433>.



- [Mannion, 1991] G. Mannion, "Nodularising method," 1991. Número de aplicación: 91300014.7. Espacenet. Gran Bretaña. Organización: T. I. M. M. C. Limited. 1991-01-02. Patente No. 0439244A1.
- [Andersson, 2015] S. Andersson, "Study of Dross in Ductile Cast Iron Main Shafts," Department of Health, Science and Technology, Division of Science and Technology, Karlstads University, Sweden, Master Thesis 2015, Url: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:842278/FULLTEXT01.pdf>.
- [Esag, 2015] ESAG, "EN-GJS-400-18-LT ( 5.3103)," European Steel and Alloy Grades / Numbers, 2015.
- [Girchovib, 1982] N.G. Girchovib, *Método de investigación para determinar la Formación del hierro con grafito esferoidal y su valoración (en ruso)*: Masgish, 1982.
- [Reed, 2006] R.C. Reed, *The superalloys: fundamentals and applications*: Cambridge University Press, 2006.
- [Versuvius, 2017] Versuvius, "Foundry-Foseco - a world leader in the supply of foundry consumables and solutions," (<https://www.vesuvius.com/en/our-solutions/international/foundry.html>), 2017. 2017-01-15.
- [Liu, *et al.*, 1999] B.C. Liu, H.D. Zhao, W.Y. Liu, D.T. Wang, D. Shangguan, y J. Cheng "Study of microstructure simulation of spheroidal graphite cast iron," *International Journal of Cast Metals Research*, Vol. 11, No. 6, pp. 471-476, 1999, Doi: <http://10.1080/13640461.1999.11819319>.
- [Çetinarslan y Genç, 2014] C. S. Çetinarslan y S. K. Genç "Study in the variation of mechanical properties of nodular cast iron depending upon section thickness," *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, Vol. 45 No. 2, pp. 106–113, February 2014, Doi: <http://10.1002/mawe.201400207>, Url: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/mawe.201400207/full>.
- [Ryntz y Thomas, 1972] E.F. Ryntz y O. Thomas, "Method of inoculating nodular cast iron," 1972. Número de aplicación: 93,632. Espacenet. USA. Organización: G. M. Corporation. 1972-04-25. Patente No. 3,658,115.
- [Gumienny y Gietka, 2015] G. Gumienny y T. Gietka "Continuous Cooling Transformation (CCT) Diagrams Of Carbide Nodular Cast Iron," *Archives of Metallurgy and Materials*, Vol. 60, No. 2, pp. 705-710, 2015, Doi: <http://doi.org/10.1515/amm-2015-0195>, Url: <https://www.degruyter.com/view/j/amm.2015.60.issue-2/amm-2015-0195/amm-2015-0195.xml>.
- [Larker, 2009] R. Larker "Solution strengthened ferritic ductile iron ISO 1083 / JS / 500-10 provides superior consistent properties in hydraulic rotators," *China Foundry*, Vol. 6, No. 4, pp. 343-351, 2009, Url: <http://www.foundryworld.com/uploadfile/200912443017589.pdf>.
- [Igarashi y Okada, 1998] Y. Igarashi y S. Okada "Observation and analysis of the nucleus of spheroidal graphite in magnesium-treated ductile iron," *International Journal of Cast Metals Research*, Vol. 11, No. 2, pp. 83-88, 1998, Doi: <http://10.1080/13640461.1998.11819261>.



- [Degois y Gouvenel, 1975] M.L. DeGois y D.C. Gouvenel, "Method for obtaining spheroidal graphite castings," 1975. Número de aplicación: 358,229. Espacenet. USA. Organización: P.-A.-M. S.A. 1975-11-04. Patente No. 3,916,979.
- [Vasiliev, *et al.*, 1979] E.A. Vasiliev, P.S. Sirotinsky, y D.P. Ivanov, "Method of continuous production of nodular cast iron," 1979. Número de aplicación: 826,050. Espacenet. USA. Organización. 1975-04-24. Patente No. 4,150,979.
- [Morita y Kano, 2008] A. Morita y T. Kano "Melting Automation Using a Medium-Frequency Induction Furnace," *International Journal of Automation Technology*, Vol. 2, No. 4, pp. 276-279, 2008.
- [Stig, 1996] B. Stig, "Method for manufacturing spheroidal graphite iron," 1996. Número de aplicación: PL19910298855 19911011. Espacenet. Polonia. Organización: S. AB. 1996-05-31. Patente No. PL169001 (B1).
- [Zhang, 2010a] H. Zhang, "Method for eliminating subsurface pores of nodular iron casting," 2010a. Número de aplicación: CN20091102461 20090306. Espacenet. China. Organización: S. H. F. C. Ltd. 2010-09-08. Patente No. CN101823125 (A).
- [Alonso, *et al.*, 2014a] G. Alonso, D.M. Stefanescu, R. Suarez, A. Loizaga, y G. Zarrabeitia "Kinetics of graphite expansion during eutectic solidification of cast iron," *International Journal of Cast Metals Research*, Vol. 27, No. 2, pp. 87-100, 2014a, Doi: <http://10.1179/1743133613Y.000000008>.
- [Alonso, *et al.*, 2014b] G. Alonso, D.M. Stefanescu, R. Suarez, A. Loizaga, y G. Zarrabeitia "Understanding graphite expansion during the eutectic solidification of cast iron through combined Linear Displacement and Thermal Analysis," *International Foundry Research*, Vol. 66, No. 4, pp. 1-12, 2014b.
- [Cabanne, 2008] P. M. Cabanne, "The efficiency of your magnesium treatment varies: check the following points," en *Sorelmetal Technical Services*, 2008, pp. 1-3.
- [Askeland, *et al.*, 2010] D.R. Askeland, P. P. Phulé, y W.J. Wright, *The science and engineering of materials*: Cengage Learning, 2010.
- [Voigt, *et al.*, 2009] R. Voigt, P. Lynch, y T. Grenko "Cast iron modification with non-contact acoustic stimulation," *International Journal of Metalcasting*, Vol. 9, pp. 79-86, 2009.
- [Castro-Román, 1991] M.J. Castro-Román, "Etude experimentale et modelisation de la solidification des pieces coulees en fonte a graphite spheroidal," Institut National Polytechnique de Lorraine, Lorraine, Francia, Tesis Doctoral 1991.
- [Gumienny, *et al.*, 2015] G. Gumienny, M. Donmdzbach, y B. Kacprzyk "Effect of Chromium on the Solidification Process and Microstructure of Vermicular Graphite Cast Iron," *Archives of Foundry Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 29-34, 2015, Url: <https://www.degruyter.com/view/j/afe.2015.15.issue-3/issue-files/afe.2015.15.issue-3.xml>.
- [Davis, 1999] K.G. Davis "Dissolution of Mg-Fe-Si alloy during "In mold" treatment," *British Foundryman*, No. 8, 1999.
- [Ma y Zhang, 2009] Y. Ma y J. Zhang, "QT600-3 ductile iron casting and method for producing the same," 2009. Número de aplicación: CN20081243632 20081211.

- Espacenet. China. Organización: C. Q. L. C. Ltd. 2009-04-29. Patente No. CN101418414 (A).
- [Yunqing, 2015] C. Yunqing, "Preparation method for preparing as-cast ferrite nodular iron by one time," 2015. Número de aplicación: CN20131497839 20131022 Espacenet. China. Organización: Q. H. M. C. Ltd. 2015-04-29. Patente No. CN104561745 (A).
- [Karsay, 1992] S. Karsay, "Producción de hierro nodular," 2da edición ed: Titanic Inc. Company, 1992.
- [Smirnov, et al., 2002a] A.N. Smirnov, V.L. Pilyushenko, S.V. Momot, 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.
- [Campbell, 1981] J. Campbell "Effects of Vibration During Solidification," *International Metals Reviews*, Vol. 2, No. 2, pp. 71-107, 1981.
- [Smirnov, et al., 1991] A.N. Smirnov, Y.V. Pettik, y S.G. Ahmedov, *Mecanismo para el tratamiento vibratorio del metal fundido (en ruso)* Moscú: Litieinoe Proizbodstbo, 1991.
- [Smirnov, et al., 2002b] A.N. Smirnov, V.L. Pilyushenko, S.V. Momot, y V.N. Amitan "Endurecimiento del fundido metálico bajos influencias externas (en ruso)," *Litieinoe Proizbodstbo*, Vol. 53, pp. 91-106, 2002b.
- [Efimov y Eldarhanov, 1995] V. A. Efimov y de A.S. Eldarhanov, *Métodos de la influencia externa sobre los procesos del endurecimiento de las aleaciones (en ruso)* Kiev: Metalurgia, 1995.
- [Efimov y Eldarjanov, 2004] V.A. Efimov y A.S. Eldarjanov, "Tecnologías metalúrgicas modernas (en ruso)," Moscú: Nobie Tecnologi, 2004.
- [Ten, 2009] E.B. Ten "Influence of Low-Frequency Vibration on the Structure and Properties of Cast Iron," *Steel in Translation*, Vol. 39, No. 7, pp. 1-3, 2009, Doi: <http://10.3103/S0967091209070092>, Url: <http://link.springer.com/article/10.3103/S0967091209070092>.
- [Wen-Qi, et al., 2016] Z. Wen-qi, Z. Zhi-guo, Y. Hao, y L. Wei "Effect of vibration frequency on microstructure and performance of high chromium cast iron prepared by lost foam casting," *China Foundry*, Vol. 13, No. 4, pp. 248-255, 2016, Doi: <http://10.1007/s41230-016-6037-3>.
- [Sánchez-Figueroa, et al., 2015c] R.P. Sánchez-Figueroa, A.M. Quesada-Estrada, y M.A. Meléndez-Bernal, "Sustitución de la madera por poliesterol expandido en la producción de artículos fundidos de hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal utilizando el método de vertido vibratorio," en *VII Conferencia Científica Internacional de la Universidad de Holguín*, Holguín, Cuba, 2015c.
- [Sánchez-Figueroa, 2009b] R.P. Sánchez-Figueroa, "Entorno tecnológico alternativo para la producción competitiva, sostenible y sustentable de fundidos de cuproaleaciones densos," Escuela Politécnica Nacional de Ecuador, Repositorio de la Escuela Politécnica Nacional de Ecuador 2009b.
- [Jiachen y Xuezhong, 2014] C. Jiachen y D. Xuezhong, "Production process and production method for base iron melt eutectic nodular iron," 2014. Número de





- aplicación: CN20141217298 20140516. Espacenet. China. Organización: T. C. C. Ltd. 2014-08-13. Patente No. CN103981320 (A).
- [Zhang, 2010b] J. Zhang, "Method for producing molten iron for casting by using medium frequency furnace and iron scrap," 2010b. Número de aplicación: CN2008153898 20080721. Espacenet. China. Organización: T. X. E. A. M. Pro. 2010-01-27. Patente No. CN101633970 (A).
- [Escobar, *et al.*, 2015] A. Escobar, D. Celentano, M. Cruchaga, y B. Schulz "On the Effect of Pouring Temperature on Spheroidal Graphite Cast Iron Solidification," *Metals*, Vol. 5, No. 2, pp. 628-647, 2015, Doi: <http://10.3390/met5020628>, Url: [www.mdpi.com/2075-4701/5/2/628/pdf](http://www.mdpi.com/2075-4701/5/2/628/pdf).
- [Abasov y Razulov, 1975] Ch.M. Abasov y A. M. Razulov, *Producción de fundidos de hierro de alta resistencia con grafito esferoidal (en ruso)* Baku: Azerizdatelstbo, 1975.
- [Cho, *et al.*, 2007] G.S. Cho, K.H. Choe, K.W. Lee, y A. Ikenaga "Effects of alloying elements on the micro-structures and mechanical properties of heavy section ductile cast iron," *Journal of Materials Science and Technology*, Vol. 23, No. 1, pp. 97-101, 2007.
- [Shinde, *et al.*, 2012] V.D. Shinde, B. Ravi, y K. Narasimhan "Solidification behaviour and mechanical properties of ductile iron castings with varying thickness," *International Journal of Cast Metals Research*, Vol. 2, No. 6, pp. 364-373, 2012.
- [Zou, 2012] Y. Zou, "Influence of alloying elements and melting conditions on graphite morphology and matrix in Fe-C and Ni-C alloys," Waseda University 2012.
- [Pencea, *et al.*, 2011] I. Pencea, D.M. Stefanescu, R. Ruxanda, y F.A. Anghelina "New Aspects Regarding the Structure of Spheroidal Cast Iron Carbon Inclusions Revealed by WAXD Investigations," *Key Engineering Materials*, Vol. 457, pp. 120-125, 2011, Doi: <http://10.4028/www.scientific.net/KEM.457.120>.
- [Sjogren y Svensson, 2007] T. Sjogren y I.L. Svensson "The Effect of Graphite Fraction and Morphology on the Plastic Deformation Behavior of Cast Irons," *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 38A, pp. 840-847, 2007, Doi: <http://10.1007/s11661-007-9115-8>.
- [Tartera, *et al.*, 2003] J. Tartera, N. Llorca-Isern, M. Marsal, y J.L. Rojas "Similarities of nucleation and growth of spheroidal and compacted graphite," *International Journal of Cast Metals Research*, Vol. 16, No. 1-3, pp. 131-135, 2003, Doi: <http://10.1080/13640461.2003.11819571>.
- [Prakash P, 2011] Mytri V Prakash P, Hiremath P. "Digital microstructure analysis system for testing and quantifying the ductile cast iron.," *International Journal of Computer Applications*, p. 19, 2011.
- [Nishi, *et al.*, 1976] S. Nishi, T. Kobayashi, y S. Taga "The effect of microstructure on the toughness of ferritic nodular cast iron," *Journal of Materials Science*, Vol. 11, pp. 723-730, 1976.
- [Gost\_60\_07-75, 1975] GOST\_60\_07-75, "GOST 60 07. Calidad superficial de los fundidos (en ruso)," 1975.





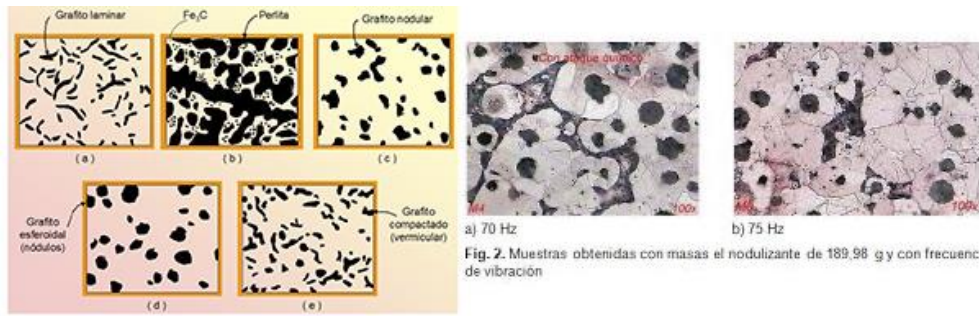


Fig. 2. Muestras obtenidas con masas el nodulizante de 189,98 g y con frecuencias de vibración

