



Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa

“Dr. Antonio Núñez Jiménez”

Facultad de Metalurgia y Electromecánica

Departamento de Metalurgia-Química

# **ESTABLECIMIENTO DE LOS PARÁMETROS DE VIBRACIÓN EN LA OBTENCIÓN DE HIERRO GRIS CON GRAFITO ESFEROIDAL**

**TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE MASTER EN METALURGIA**

**Yoandri Savón Zaldivar**

**Holguín**

**2015**



Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa

“Dr. Antonio Núñez Jiménez”

Facultad de Metalurgia y Electromecánica

Departamento de Metalurgia-Química

# **ESTABLECIMIENTO DE LOS PARÁMETROS DE VIBRACIÓN EN LA OBTENCIÓN DE HIERRO GRIS CON GRAFITO ESFEROIDAL**

**TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE MASTER EN METALURGIA**

**Autor: Ing. Yoandri Savón Zaldívar.**

**Tutores: Prof. Tit. , Ing. Roberto Pérez Rodríguez , Dr.C**

**Prof. Aux. ,Ing. Rigoberto Pastor Sánchez Figueredo , MSc.**

**Holguín**

**2015**



# AGRADECIMIENTOS

Sinceramente:

**A** mis tutores en especial al M.Sc. Rigoberto Pastor Sánchez Figueredo por su constancia durante todo el trabajo realizado, por haber sido la fuente de donde surgió este trabajo y por la confianza que ha depositado en mí para la realización del mismo.

**Al** claustro de profesores de la maestría profesores por su dedicación, paciencia y desinterés durante todo este tiempo entre ellos y en especial al Dr. C Amaury palacios Rodríguez, por su ayuda desinteresada y su preocupación por mostrar un trabajo con la mayor calidad.

**A** mis padres, a mis abuelos, hermanos, a mis tíos, a mis sobrinas y sobrinos, a mis primos.

**A** mi gran familia que siempre ha resultado ser mi razón de vida

**A** mis compañeros y amigos, Alexis Ronda Oro, Ramón Fernández Guerra, Melzer Delgado Cruz y Rogelio Ramentol, Yosvani, Yordanis Sánchez Leyva, Miguelito, Jairon Duran Matos que realmente me han brindado su apoyo en todos estos años.

**A** Gretel Beatris Roman Barban por su incondicional ayuda, su gran apoyo y su agradable compañía.

**Al** Señor por ser la fuerza motriz de las cosas buenas. Por la orientación y apoyo que me brinda. A todos aquellos que han hecho posible la culminación de este trabajo.

Muchas gracias

## PENSAMIENTOS

“...La voluntad es la clave del éxito y el sacrificio es la inmortalidad...”

Fidel Castro Ruz

## **RESUMEN**

Como resultado de esta investigación se establece la relación existente entre los parámetros de vibración (frecuencia y la amplitud) y la calidad de la producción, y permite implementar una línea de producción industrial de fundidos de hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal por el método de vertido vibratorio, que dan solución al problema del taller de fundición de la empresa Mecánica de Holguín, que al no conocer la relación existente entre la frecuencia y la amplitud de vibración con la calidad de los fundidos de hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal obtenidos por el régimen de vertido vibratorio, no podía comercializar sus producciones. Por primera vez se establece una tecnología con basamento científico y conocimiento de todos los parámetros tecnológicos necesarios que permiten establecer en el País una línea de producción industrial de artículos de hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal por el proceso "In mold" y el método de vertido vibratorio.

**Palabras claves:** Hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal, proceso "In mold", método de vertido vibratorio

## **ABSTRACT**

As a result of this investigation the existent relationship settles down among the vibration parameters (frequency and the width) and the quality of the production, and it allows to implement a line of industrial production of having fused of gray iron of high resistance with graphite spheroidal for the method of having poured vibratory that give solution to the Problem of the shop of foundry of the Mechanical Company of Holguín that when not knowing the existent relationship between the frequency and the vibration width with the quality of those fused of gray iron of high resistance with graphite spheroidal obtained by the régime of having poured vibratory, it could not market its productions and for the first time a Technology settles down with scientific basement and knowledge of all the necessary technological parameters that allow to settle down in the Country a line of industrial production of articles of gray iron of high resistance with graphite spheroidal for the process "In mold" and the method vibratory discharge

**Key words:** gray iron of high resistance, spheroidal graphite , process "In mold", method vibratory discharge

ÍNDICE	Pág.
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>0</b>
<b>1 MARCO TEORICO CONCEPTUAL.....</b>	<b>6</b>
1.1 Antecedentes fundamentales relacionados con el proceso “In Mold”.....	6
1.1.1    Parámetros que influyen sobre la obtención del hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal por el proceso “In-mold”y el método de vertido vibratorio.....	9
1.2 Antecedentes del vertido vibratorio en la obtención de fundidos de metales ferrosos y no ferrosos.....	20
<b>Conclusiones del capítulo .....</b>	<b>22</b>
<b>2 MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>24</b>
2.1 Metodología de cálculo de los parámetros para la obtención de hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal en el proceso “In mold” con el método de vertido vibratorio .....	24
2.1.1    Diseño de la cámara de reacción .....	26
2.1.2    Cálculo del peso de la pieza .....	27
2.1.3    Porcentaje de azufre en el caldo metálico base +Scmb .....	28
2.1.4    Determinación del Magnesio residual deseado .....	29
2.1.5    Pérdida por fusión del Mg .....	29
2.1.6    Porcentaje de Mg en la aleación nodulizante .....	29
2.1.7    Diseño del sistema de alimentación .....	34
2.2 Diseño del experimento.....	39
2.2.1    Preparación y ensayo de las muestras.....	41
<b>Conclusiones del capítulo .....</b>	<b>44</b>
<b>3 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS .....</b>	<b>45</b>
3.1 Análisis metalográfico.....	45
3.2 Estudio Radiográfico.....	47

3.3	Análisis de las Propiedades mecánicas.....	47
3.4	Análisis estadísticos de los resultados .....	49
3.4.1	Análisis de la Varianza para la resistencia a la tracción (Rm).....	49
3.4.2	Análisis de la Varianza para la elongación (A) .....	51
3.4.3	Análisis de la Varianza para la Dureza (HB).....	53
	<b>Conclusiones del capítulo .....</b>	<b>55</b>
	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>56</b>
	<b>Valoración Económica .....</b>	<b>57</b>
	<b>Valoración Ambiental.....</b>	<b>58</b>
	<b>Valoración para la Defensa.....</b>	<b>64</b>
	<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>65</b>
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>66</b>

## INTRODUCCIÓN

Es de vital importancia para el progreso de un país, el desarrollo de la construcción de maquinarias. Dentro de esta rama de la industria, lo que se refiere a la producción de artículos metálicos ocupa un lugar preponderante y las aleaciones ferrosas son hoy en día un punto clave del desarrollo. Las mismas son base fundamental en la industria de la construcción, la fabricación de piezas para maquinarias agrícolas, la industria automovilística, la industria naval y la industria azucarera (Sánchez, 2007).

Las aleaciones ferrosas constituyen una amplia gama de materiales que se pueden clasificar, ya sea por su estructura como por su composición química. Una de las más difundidas, tanto por su uso como por su factibilidad económica, son las llamadas fundiciones, estas no son más que aleaciones hierro-carbono con un porcentaje de carbono por encima de 2,13 %, además de otros elementos que son constantes y considerados impurezas cuando no se utilizan con el fin de darles características específicas a las mismas. Las fundiciones por su composición química se clasifican en fundiciones grises y fundiciones aleadas y por su estructura tenemos las fundiciones grises con grafito laminar, fundición con grafito vermicular, fundición maleable, fundiciones blancas y fundiciones con grafito esferoidal.

El hierro con grafito esferoidal puede superar al acero en cuanto a sus propiedades de fundición, menor densidad y menor costo por tonelada. Por ese motivo es una tendencia mundial la sustitución de piezas de acero e hierro fundido, por hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal. Esta tendencia se observa fundamentalmente en la industria automovilística, la industria naval, de materiales de la construcción, la construcción de maquinarias agrícolas. Nuestro país no se ha quedado atrás en esa tendencia mundial .

La empresa Mecánica Héroes del 26 de Julio de la provincia de Holguín, es una de las entidades que tiene dentro de sus planes de desarrollo la implementación de la producción de hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal. La misma está ubicada en la carretera de San Germán km 3 ½ en Holguín. Fue fundada en julio de

1980 y redimensionada en el año 2003, consta de dos talleres fundamentales para su producción. El taller de producciones ferrosas con un horno de cuba alta discontinuo de 700 mm de diámetro interior. La capacidad calculada del mencionado taller es de 360 t al año. Se producen piezas principalmente para la Industria Mecánica, el MINAZ, el Turismo, el MINBAS. El moldeo se realiza en cajas metálicas de diversas dimensiones y se utilizan mezclas en verde. En la actualidad, la carga para la producción del hierro fundido gris presenta la siguiente composición: 55 % chatarra de hierro, 25 % de arrabio y 20 % retorno de la propia producción.

El contenido de azufre en el metal base, a partir del año 1998 ha aumentado de 0,06 % hasta 0,09 % según datos (Savón & Sánchez 2014). El Hierro gris que se produce es hipoeutéctico, o sea, con un carbono equivalente menor de 4,3 %. Posee un taller secundario para la elaboración y secado de los machos, estos son elaborados con mezclas de arena sílice, bentonita, fuel oil o aceite quemado y melaza con secados en estufas a temperaturas de 180 a 220 °C. Presenta un sistema de moldeo mecanizado con máquinas neumáticas movidas por un compresor que impulsa de forma estable aire comprimido a 6 atmósferas de presión.

El taller de fundiciones no ferrosas en su entorno tecnológico cuenta con: horno de crisol para la fusión de bronce, horno tambor para la fusión de aleaciones de aluminio y se moldea con pisones neumáticos y mezclas en verde. El área tiene un taller auxiliar de herramental para la construcción de los modelos, accesorios, dispositivos y mantenimiento necesario para la ejecución de la producción.

El azufre es el principal demodificador en la obtención de aleaciones de hierro con grafito esferoidal. Actualmente, en Cuba la compra de arrabio para fundición de las marcas P1 y P2 que tienen bajos por cientos de C, Si, P y S se hace prácticamente imposible, por lo tanto se ha realizado una adecuación de las condiciones de producción, donde el material base para la fusión en los hierros fundidos lo constituye la chatarra de hierro.

Para la fusión de hierro se utilizan en Cuba hornos con revestimiento ácido. Esto hace imposible el control del contenido de azufre dentro del horno. Por otra parte, las

industrias cubanas no tienen posibilidad de obtener en mercados foráneos materiales especializados para la producción de hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal por métodos avanzados (Sánchez, 2008).

El moldeo en nuestro taller es casi todo en verde y es escaso el empleo de métodos avanzados de obtener el molde, lo que hace imprescindible el uso de cajas para este paso tecnológico. Esto dificulta y encarece la construcción de dispositivos para la obtención del hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal por vías conocidas en el mundo (Sánchez, 2011) pero por sus exigencias constructivas se hace necesario la aplicación de inversiones y el aumento de la competitividad, sostenibilidad y sustentabilidad.

Esta problemática ha generado a lo largo de los años el desarrollo de investigaciones en busca de su solución. Un número considerable de investigaciones ( Arévalo, 2008) han estado enfocadas en el proceso de obtención del hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal, principalmente con la finalidad de determinar los parámetros que influyen sobre el proceso y de lograr optimizar los mismos, de forma tal que se obtengan aleaciones con altas propiedades y con el menor costo posible.

Sánchez (2007) establece un análisis y los procedimientos para la obtención de hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal bajo las condiciones específicas de la industria en Cuba, implementada en la empresa Mecánica Héroes del 26 de Julio. También Sánchez (2008) emplea un entorno tecnológico alternativo para la producción competitiva, sostenible y sustentable de fundidos, utilizando el método de vertido vibratorio. El autor define la frecuencia de vibración de 65 Hz como tecnológica en la eliminación de las inclusiones no metálicas en las piezas fundidas y aunque la calidad alcanzada cumple con las expectativas de los clientes, es necesario conocer la influencia de la amplitud de vibración en la calidad de los artículos fundidos.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, se plantea la siguiente **situación problémica**: la producción de hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal obtenida por el régimen de vertido vibratorio, aunque satisface las exigencias del

cliente, no se ha podido implementar como línea de producción industrial debido a que no se ha establecido con exactitud los parámetros tecnológicos del régimen vibratorio.

Como **problema** se define el poco conocimiento de la relación existente entre la frecuencia y la amplitud de vibración en la calidad de los fundidos de hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal, obtenidos por el régimen de vertido vibratorio.

Como **objeto de estudio** se define a los métodos de producción de hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal y como **campo de acción** los parámetros de vibración (frecuencia y la amplitud) en la obtención de hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal por el método de vertido vibratorio.

En la formulación de la hipótesis se parte del hecho de que si se establece la relación existente entre los parámetros de vibración (frecuencia y la amplitud), se puede implementar una línea de producción industrial de fundidos de hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal por el método de vertido vibratorio.

A partir de la hipótesis, se plantea como **objetivo general** el establecimiento de la relación existente entre la frecuencia y la amplitud de vibración con la calidad de los fundidos de hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal, obtenidos por el régimen de vertido vibratorio.

Como **objetivos específicos** de la investigación se plantean:

- Caracterizar los procedimientos existentes, los métodos más avanzados y su estado actual de aplicación en la tecnología para la producción de hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal.
- Determinar los parámetros tecnológicos (amplitud y frecuencia) de vibración en la obtención del hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal por el proceso "In mold" y el método de vertido vibratorio.
- Establecer la tecnología para la obtención del hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal por el proceso "In mold", utilizando el método de vertido vibratorio de manera competitiva, sostenible y sustentable.

Para dar cumplimiento a los objetivos declarados y confirmar la hipótesis del trabajo se realizan las siguientes tareas.

### **Tareas de la investigación**

1. Recopilación y análisis de los trabajos relacionados con el proceso “In mold” y el método de vertido vibratorio así como la exploración de la problemática mundial, nacional y local de la obtención de hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal.
2. Análisis de los métodos y procedimientos existentes en la obtención de fundidos de hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal.
3. Obtención de la relación existente entre la amplitud y la frecuencia de vibración con la resistencia a la tracción, dureza y elongación de los fundidos de hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal obtenidos por el proceso “In mold” y el método de vertido vibratorio.
4. Determinación de la tecnología de obtención de los fundidos de hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal obtenidos por el proceso “In mold” y el método de vertido vibratorio.

Los **beneficios esperados** de la investigación se expresan en el establecimiento de los parámetros tecnológicos necesarios en la obtención de hierro gris de alta resistencia con grafito obtenido por el proceso “In mold” y el método de vertido vibratorio.

Los métodos científicos cumplen una función fundamental en el desarrollo de la ciencia, ya que permiten obtener nuevos conocimientos sobre el fenómeno que se estudia y ejercen un papel importante en la construcción y desarrollo de la teoría científica.

En las ciencias se aplican una variedad de métodos teóricos, dentro de ellos están: el método de análisis y la síntesis, el hipotético-deductivo, el análisis histórico y el lógico, el de tránsito de lo abstracto a lo concreto, la modelación y el enfoque de sistema. Cada uno cumple funciones gnoseológicas determinadas, por lo que en el proceso de realización de una investigación científica se complementan entre sí.

A continuación se exponen los **métodos** fundamentales utilizados en la investigación:

- **Método histórico-lógico:** Este se aplica para establecer el estado del arte del tema de investigación, como marco teórico referencial, permitiendo conocer que se ha investigado sobre el tema objeto de estudio y que leyes o aspectos generales se abordan en el fenómeno que se estudia.
- **Método de inducción-deducción:** A partir del estudio de diferentes casos particulares se llega a establecer aspectos que son generales y leyes empíricas, que constituyen puntos de partida para inferir o confirmar formulaciones teóricas, de las cuales se deducen nuevas conclusiones lógicas que son sometidas a prueba de acuerdo con las generalizaciones empíricas. Se aplicará para la evaluación de los diferentes criterios que intervienen en el establecimiento de los parámetros tecnológicos (amplitud y frecuencia) de vibración en la obtención del hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal por el proceso "In mold" y el método de vertido vibratorio.
- **Método de análisis y síntesis:** Se utiliza para identificar los factores principales y sus características que influyen en el fenómeno que se estudia, así como su interrelación. Se aplica para identificar las etapas que intervienen en el establecimiento de los parámetros tecnológicos (amplitud y frecuencia) de vibración en la obtención del hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal por el proceso "In mold" y el método de vertido vibratorio.
- **Método computacional:** Se utiliza durante la concepción y desarrollo de la aplicación informática para asistir en el cálculo de los parámetros que intervienen en el establecimiento de los parámetros tecnológicos (amplitud y frecuencia) de vibración en la obtención del hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal por el proceso "In mold" y el método de vertido vibratorio.

# 1 MARCO TEORICO CONCEPTUAL

En el presente capítulo se exponen los antecedentes fundamentales relacionados con el proceso “In Mold” a escala nacional e internacional, con el objetivo de describir los trabajos previos de la investigación. Se analizan los parámetros que influyen sobre la obtención del hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal por el método de vertido vibratorio “In-mold”, con el objetivo de identificar las principales variables que intervienen en el desarrollo de la tecnología para la obtención de este tipo de material.

## 1.1 Antecedentes fundamentales relacionados con el proceso “In Mold”

Son diversos los investigadores que han abordado la obtención del hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal por el proceso “In mold”, con la finalidad de determinar los parámetros que influyen sobre el proceso de lograr optimizar los mismos, de forma tal que se obtengan aleaciones con altas propiedades y con el menor costo posible.

Dunks (1976) en experimentos realizados llega a conclusiones importantes. Logra de forma práctica establecer una interrelación entre el factor solución y el contenido de magnesio residual en la pieza. Plantea que para este tipo de proceso es indispensable determinar el nivel de magnesio residual requerido en el caldo metálico, en correlación con el magnesio presente en el nodulizante para las condiciones particulares requeridas del metal. Recomienda utilizar la relación cuantitativa de la aleación nodulizante a través de (1.1).

$$Ra = \frac{Mgres}{Mg} \quad (1.1)$$

Donde: Ra: relación cuantitativa de la aleación; Mgres: magnesio residual deseado; Mg: cantidad de magnesio que reacciona en dependencia del rendimiento de la aleación nodulizante.

Se ha establecido que la efectividad de la nodulización es más alta, cuando el tiempo desde la adición del nodulizante hasta el comienzo de la solidificación no es prolongado, independientemente del lugar donde sea aplicado el nodulizante (Boletín, 2001; Genderevich, 1999; Hughes, 1993). Para esto, deben ser tomados en cuenta dos requerimientos fundamentales:

- La pre-aleación debe disolverse con prontitud y continuar con una concentración fija y uniforme desde el inicio hasta el fin del vertido.
- Los residuos de pre-aleación sin disolver no deben dejarse arrastrar hacia el interior de la pieza.

(Dunks, 1976) para satisfacer estas condiciones, se propuso varias soluciones en las cuales plantea que, la pre-aleación debe ser agregada en la forma física más apropiada, es decir, en una sola pieza o en granos sueltos o con filtros inoculantes y granos compactos, según sea necesario.

(Dunks (1976); McCaulay (1991) presentaron una solución satisfactoria al problema de la disolución uniforme que se denominó proceso “In-mold” con cámara de reacción. Consiste en colocar la aleación en forma de gránulos en una cámara convenientemente diseñada que mantenga una velocidad de disolución constante durante el vertido, siempre y cuando la velocidad de flujo del hierro sea invariable.

La sección transversal horizontal de la cámara que contiene la aleación se debe mantener al mismo nivel, de modo que, el área superficial de la aleación expuesta al flujo del hierro siempre sea constante durante el vertido Castledine (1988); Lince (2004). Para un tipo de aleación, la velocidad de disolución está determinada por el tamaño de la cámara y por otros parámetros de la colada. El tratamiento en el molde ofrece las siguientes ventajas:

- Alto aprovechamiento de la pre-aleación y excelente calidad en la microestructura.
- No es necesario el escoriado entre las operaciones de adición de aleación y vaciado.

- Se obtienen diferentes marcas de hierro con grafito esferoidal, con solo adicionar la cantidad y calidad propia de nodulizante en cada molde, dependiendo de los requerimientos.
- No se presenta el fenómeno de piroefecto o emisiones de humo no hay contaminación del metal no vertido y este puede ser regresado al horno sin ningún problema posterior.
- La factibilidad de adiciones totalmente automática del nodulizante.

Sin embargo, mientras se presentan estas considerables ventajas, el proceso de tratamiento en el molde también se ve afectado por algunas características desfavorables que requieren una atención cuidadosa, éstas son:

- Necesidad de una cámara de reacción adecuada y a veces excesivamente grande
- Tendencia a inducir algunas inclusiones en las fundiciones.
- Necesidad de nuevos conceptos de control de la calidad en la producción.

Una preocupación de los productores de hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal obtenidos por el método "In-mold", es la tendencia a la introducción de escoria e inclusiones a la pieza Metallography (2006). Con respecto a ese punto, se plantea que al establecer una relación de los componentes del sistema de alimentación A alimentadores: A escoriador: A salida de la cámara: A conexión con cámara: área del tragadero (A trag). 1:1, 112:1, 112:1, 112:1, 112: (es decir a que cada elemento siguiente del sistema de alimentación es 12 % mayor que el anterior) el flujo de metal logra que en cada elemento siguiente del sistema de alimentación, el cual tiene mayor altura que el anterior, queden atrapadas las suciedades en la parte superior de la sección, para evitar así su paso a la parte posterior y así sucesivamente sirve de trampa hasta lograr una pieza limpia.

Cenkebich (1999) llega a la conclusión de que la distancia entre los alimentadores y la salida desde la cámara de reacción no debe ser inferior a los 150 mm

así como la altura del modificador en la cámara de reacción no debe ser inferior a los 30 mm. De ser así, se observa una disolución brusca del modificador en los primeros cinco segundos sin dar tiempo a la modificación total del nodulizante.

Boletín (2001); Fundinox (2014) han realizado investigaciones sobre la nodulización en el molde y se hicieron algunas consideraciones iniciales sobre algunas de las características que debían cumplir los nodulizantes, de modo que fuesen efectivos y seguros en su comportamiento, estas fueron:

1. El nodulizante tenía que ser eficiente en la nucleación del grafito y por lo tanto, limitar o eliminar la formación de carburos.
2. En vista del corto período de aplicación, el nodulizante tenía que ser razonablemente soluble de forma que su efecto fuera completo antes de la solidificación de la pieza. Al respecto, se consideraron importantes tanto el carácter nodulizante como la granulometría de las partículas.
3. La distribución del nodulizante tenía que ser uniforme para evitar que quedasen zonas de hierro sin nodulizar dentro de la pieza.
4. El nodulizante no debería introducir inclusiones perjudiciales en la pieza.

### **1.1.1 Parámetros que influyen sobre la obtención del hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal por el proceso “In-mold” y el método de vertido vibratorio**

Para el buen desempeño del proceso In-mold se requiere tomar en consideración varios parámetros importantes, como son la temperatura de vertido, el tiempo de vertido, el factor de solución, la composición química del nodulizante, la granulometría, la cámara de reacción, el diseño del sistema de alimentación, la eficiencia del magnesio, el peso de la colada, el porcentaje de magnesio requerido en la pieza y la cantidad de aleación nodulizante. A continuación se explican con detalle cada uno de ellos (Dijon, 1976; Dunks, 1999).

### **1.1.1.1 Temperatura de vertido**

El control de la temperatura de vertido es de suma importancia en este proceso, ya que de ella depende en gran medida la disolución del nodulizante, limpieza de la pieza, la nodularidad de la pieza y por lo tanto la eficiencia del magnesio.

Bakkerus (1995) en estudios realizados sobre el efecto de la temperatura de vertido en el proceso In-mold sobre la nodularidad, revela que en el rango de 1 365 a 1 450 °C no existe efecto adverso alguno de considerable significación (preferentemente en la región de 1 425 a 1 450 °C). Con temperaturas menores a 1 360 °C, pueden surgir problemas como aleación no disuelta, conjuntamente con defectos de escoria, uniones frías y otros. La velocidad de formación de óxidos sólidos se incrementa conforme la temperatura disminuye.

La temperatura más importante relacionada con el proceso "In-mold", es la del metal al salir de la cámara de reacción. Durante el vertido de la cazuela al molde se pierden de 50 a 60 °C y otros de 20 a 30 °C durante el flujo desde el tragadero hasta los canales de entrada a la cámara de reacción. Entonces, la temperatura de entrada del metal a la cámara de reacción es aproximadamente 80 °C menor que la temperatura de vertido (Castledine, 1998, Cenkebich, 1999). Por esta razón, se requiere una temperatura de vertido mayor que en los otros procesos para producir hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal.

Bajo las condiciones del taller de Fundición Hierro y Acero (FHA), se propone una temperatura de salida del metal del horno de 1 450 °C, ésta permitirá que sumando las pérdidas de temperatura, la temperatura de salida de la cámara de reacción será de alrededor de 1 370 °C, valor aceptable según Sánchez (2011).

### **1.1.1.2 Contenido de azufre del metal base**

Es importante controlar el nivel de azufre del metal base, ya que interviene en la eficiencia del magnesio, es decir en la economía del proceso, así como en la obtención de una nodularidad aceptable en las piezas. Para este proceso se recomienda un nivel

de azufre de 0,015% para así minimizar el uso de la aleación nodulizante (Abramov, 1983; Girchovib, 1982; Karsay, 1992).

Pueden utilizarse mayores valores de azufre, pero tendrán que ser empleados mayores niveles de magnesio, con una posible tendencia a formar escorias de sulfuro de magnesio, silicatos de aluminio-magnesio y por lo tanto, defectos y un aumento del costo Sánchez (2014). El por ciento de azufre, elemento difícil de controlar según las características del proceso de fusión de la fundición Hierro – Acero, se encuentra en un 50 % por encima de lo recomendado.

De lo expresado anteriormente la recomendación se refiere a la producción que se realiza a gran escala y se llega a dos conclusiones:

1. Es necesario aplicar una tecnología de desulfuración en cazuela para la producción de hierro con grafito esferoidal a gran escala en esta empresa y esto provocaría un encarecimiento del proceso.
2. El contenido de azufre no influye notablemente para la ejecución de trabajos experimentales a pequeña escala, pues se puede suplir el efecto desmodificado del mismo con aumento de magnesio, cuestión que en la producción a gran escala afecta la economía del proceso.

Producto de la ausencia de arrabio y la introducción de chatarra de hierro rico en azufre, en datos tomados de Sánchez ( 2001) el contenido medio de azufre en el metal producido en el Taller de Fundición de Hierro y Acero era de 0,067 %, con un aumento del contenido de azufre de 44,77 % con relación al contenido de azufre promedio controlado por Sánchez ( 2008)

### **1.1.1.3 Velocidad de vertido**

Es factible el cálculo de la velocidad de vertido si se tiene como guía las recomendaciones de Dunks (1976). Se afirma que en caso de no existir experiencia en ese sentido, se puede tomar como valor de la velocidad de vertido el resultado del cálculo recomendado por Dunks(1976) como punto de partida y luego adecuar la misma a las condiciones propias de la planta (Dunks, 1976; Davis, 1990).

Se debe tener en cuenta el tipo de vertido, la cazuela utilizada y la habilidad de los operarios durante el desarrollo del proceso “in-mold”, ya que influye en el tiempo de vertido de la pieza, en el factor de solución empleado y por consiguiente en la velocidad de disolución de la aleación. La velocidad de vertido se puede determinar por la expresión (1.4) (Dunks, 1976; Davis, 1990).

$$V_v = \frac{P_c}{T_v} \quad (1.4)$$

Donde:

$V_v$ : Velocidad de vertido.

$P_c$ : Peso total de la pieza (colada);

$T_v$ : Tiempo de vertido.

Gorshkob (1978) explica que está claro que al aumentar la velocidad de vertido se reduce el tiempo de vertido. En otros casos, se recomienda partir del cálculo del tiempo de vertido y luego se determina sobre la base de este, la velocidad de vertido.

La velocidad de vertido se puede modificar con la variación del diámetro del embudo y tragadero del sistema de alimentación de la colada. En este caso, para la determinación de la velocidad de vertido partimos del cálculo del tiempo de vertido por la fórmula de Ossan (1.5) Arevalo (2014).

$$T_v = S\sqrt{G \cdot K} \quad (1.5)$$

Donde:

$T_v$ : Tiempo de vertido en, s

$G$ : Masa de la pieza en, kg.

$K$ : Coeficiente que incluye la pérdida del metal en sistema de alimentación y mazarotas (1.41).

$S$ : Coeficiente que depende del espesor medio de las paredes.

#### **1.1.1.4 Tiempo de vertido**

Kobalevich (1999) expone que es otro factor importante que debe considerarse durante el desarrollo del proceso “in-mold” para producir piezas de calidad. En general, los tiempos de vertido son directamente controlados por el sistema de alimentación. Como se mencionó anteriormente, el tiempo de vertido afecta directamente a la velocidad de vertido e indirectamente a la velocidad de disolución de la aleación nodulizante. Para una velocidad de vertido constante, el tiempo de vertido se incrementa conforme al peso de la pieza.

#### **1.1.1.5 Composición química de la aleación nodulizante**

Es indispensable conocer la composición química y densidad de la aleación nodulizante utilizada en el proceso, para posteriormente determinar la cantidad de aleación nodulizante requerida y el diseño de la cámara de reacción.

Shea y Holtan (2003) acertaron que el valor de la relación Si/Mg en algún momento pueden propiciar alteraciones en el tamaño de la cámara de reacción, en particular al área superficial de la cámara. Encontraron que si la relación Si/Mg es mayor que 11 hay una baja reactividad y se requiere de una cámara de reacción con una gran área superficial para alcanzar a disolver completamente la aleación durante el tiempo de llenado del molde.

Por su parte, si la relación Si/Mg es menor de cinco, significa que existirá una reacción excesiva debido a la alta concentración de magnesio. En este último caso no se requiere de grandes áreas superficiales de las cámaras de reacción.

La relación Si/Mg siempre hay que considerarla ya que si en un momento determinado no llegase a disolver completamente la aleación, cuando todas las variables del proceso están bien controladas, esta podría darnos la pauta para solucionar dicho problema. Es factible el uso del NODULANT II como pre-aleación para la fabricación de hierro nodular mediante la tecnología “in-mold”. Por su nivel de solubilidad y propiedades obtenidas en la aleación.

### **1.1.16 Cantidad de aleación nodulizante**

La cantidad de aleación nodulizante durante el proceso "In-mold" debe ser la necesaria, ya que si es insuficiente no se obtiene una nodularidad satisfactoria en la pieza o ninguna. Por lo contrario si es excesiva, es probable que existan problemas de disolución incompleta del nodulizante, inclusiones de escoria y una reducción en la economía del proceso (Kobalevich, 1999; Francois, 2001).

Es preciso determinar la cantidad de aleación nodulizante requerida, ya que de ella depende en gran medida la eficiencia del magnesio, la disolución, el contenido de magnesio deseado en la pieza y por supuesto, la economía del proceso.

### **1.1.1.7 Eficiencia del magnesio**

Según Davis (1990), la ventaja más importante que presenta el proceso "In-mold" comparado con otros procesos de nodulización, es precisamente la gran eficiencia obtenida por el magnesio, siendo ésta generalmente superior al 80 %. Sin embargo, puede variar entre una pieza u otra y en las diferentes plantas debido al procedimiento utilizado y muchos otros factores como son: el peso de la pieza, composición química del nodulizante, temperatura de operación, nivel de azufre del hierro base, cantidad de nodulizante agregado y de la disolución de la aleación nodulizante.

Es recomendable realizar un análisis químico y verificar o comprobar que se obtengan eficiencias satisfactorias deseadas, después de la solidificación de piezas obtenidas por este proceso.

### **1.1.1.8 Porcentaje de magnesio residual deseado**

Batista (2000) señala que debe quedar por lo menos un 0,040 % de magnesio residual para conseguir que todo el grafito sea esferoidal (Alexandor, 1998; Tartera, 2002) delimitan un intervalo entre 0,035 % y 0,05 %) para obtener a la vez, la mejor, combinación de características mecánicas.

La cantidad de magnesio residual depende de los siguientes factores, entre otros: cantidad de pre-aleación, peso de la pieza, composición química del nodulizante (% de Mg), eficiencia del magnesio, contenido de azufre.

Lince (2004) refiere que cuando el contenido de magnesio residual en la fundición es excesivo, lo cual no es recomendable, en la micro estructura pueden aparecer racimos de hojuelas de grafito esferoidal y flotación de nódulos, así como existe una mayor contracción y por lo tanto es mayor el rechupe en las piezas. Por el contrario, cuando el contenido de magnesio en la fundición es bajo, se producirá en la microestructura grafito vermicular o mezclas de grafito en forma esferoidal y laminar.

#### **1.1.1.9 Diseño del sistema de alimentación**

El diseño del sistema de alimentación influye en la velocidad de disolución de la aleación, el factor solución, el diseño de la cámara de reacción, el peso total de la colada. La posición de la salida del metal de la cámara debe provocar una retención momentánea del hierro entrante sobre la cámara de reacción antes de permitir que el metal pase a los otros elementos del sistema de alimentación. También debe evitar puntos muertos en la cámara, ya que ésta es un área potencial para la erosión de la arena. Se incorporará cuanto sea posible, diseño de radios lisos. Se debe procurar sencillez al diseñar las dimensiones.

El área del escoriador puede variarse, de tal forma que se obtenga una velocidad adecuada de flujo del metal dentro del molde y con esto conseguir fundiciones limpias, libres de inclusiones de arena Aguilar (2014).

Se ha sugerido (Kobalevich, 1999) que mientras se procure mantener una distancia mínima de 150 mm entre la cámara de reacción y el primer conducto de entrada a la pieza, las velocidades requeridas del metal serán entre 200 y 500 mm/s

(8 y 20 pulg/s). Con áreas de escoriador 12 % más grandes que el área de entrega al choque (o alimentadores), se alcanzan velocidades de 700 a 760 mm/s (28 a 30 pulg/s), Luffe (1994). Esto lavará las inclusiones como SiC y MgSiO<sub>2</sub> en su camino con posibilidad de erosionar y arrastrar arena dentro de la cavidad.

La fórmula para determinar el área de choque o área del alimentador se expresa según la ecuación (1.6).Mayk (1998).

$$A_{\text{alimentacion}} = P_V \cdot \frac{K}{T_V} \sqrt{H - \frac{P^2}{2C}} \quad (1.6)$$

Donde:

$P_V$  : peso del metal vertido,kg.

$K$  : constante ( $K = 0,32$ ).

$T_V$  : tiempo de vertido en, s.

$H$  : altura del metal por encima del choque o alimentador.

$C$  : altura de la pieza.

$P$  : altura de la pieza por encima del choque.

La constante  $K$  puede variar de fundición a fundición. El reporte técnico de un comité técnico internacional (Batista<sup>c</sup>, 2003) sugiere el uso de 0,32, no obstante puede variar de 0,31 a 0,34 dependiendo de la práctica. Otra recomendación de cálculo para el área mínima del sistema de alimentación es la recomendada por Goyos (1991), el denominado método de Ossan.

Con estos aspectos, el diseñador de modelos incluyendo el sistema de alimentación en la industria de la fundición, puede conjugar de tal manera que llegue a la construcción de un sistema que le ofrezca óptimos resultados.

#### **1.1.1.10      Peso de la colada**

El peso total de cada colada depende principalmente del tamaño de la pieza y del diseño del sistema de alimentación. El peso de la colada interviene en otros parámetros Tartera (2004) como la velocidad, tiempo de vaciado, diseño de la cámara, cantidad de vaciado, y cantidad de aleación nodulizante. Para el cálculo de la cantidad de aleación nodulizante, cabe mencionar que se considera únicamente el peso a partir de la cámara de reacción hasta la pieza requerida, sin incluir el peso de los otros elementos del sistema de alimentación.

#### **1.1.1.11 Granulometría**

A pesar de tener la cantidad adecuada de esferoidizante, la granulometría llega a ser un factor importantísimo en el tratamiento de nodulización dentro del molde.

De acuerdo a varios trabajos de investigación de este proceso, se ha observado que cuando se emplean nodulizante con granulometría (o tamaño de malla) muy finas no se obtienen buenos resultados, debido a que no ocurre una disolución adecuada. Por lo contrario, cuando se utilizan granulometrías más grandes (0,056 mm) se encuentran resultados más convenientes. Cuando los nodulizantes están formados por una mezcla mecánica de compuestos, se requiere que exista una distribución de tamaño compatible para cada uno de los dos componentes, según Mannion (1994).

#### **1.1.1.12 Diseño de la cámara de reacción**

La cámara de reacción como contenedor del nodulizante y lugar donde debe ocurrir la disolución de este, ocupa un papel muy importante en el proceso, por lo que requiere que su diseño sea adecuado; además, que dependen de ella muchos otros factores como son: velocidad de vertido, factor de solución, disolución de la aleación

La velocidad de disolución en la cámara debe tener un valor tal que permita la disolución completa del nodulizante dentro de la misma para evitar la entrada de partículas a la pieza. Esto se logra con una interrelación adecuada entre el área de la cámara de reacción, la granulometría del nodulizante y la temperatura de vertido Arevalo (2014)

El factor básico para una buena nodulización en el molde es la sección horizontal de la cámara, la cual debe ser prácticamente constante en todas las alturas. Sanchez (2014) Además, es importante que los otros elementos de diseño de la cámara sean elegidos apropiadamente para satisfacer los dos requerimientos siguientes:

1. La cámara debe permitir un flujo regular del hierro sobre la aleación, para facilitar su disolución gradual.

2. El diseño de la cámara debe ser tal que los residuos de aleación sin disolver arrastrados por el hierro no penetren en la cavidad de la pieza.

Para ambos requerimientos, es conveniente evitar que el choque violento del hierro que fluye dentro de la cámara, contra una área localizada de aleación nodulizante. Esto provocará el desplazamiento y proyección de granos, con la consiguiente formación de inclusiones. Esto también puede generar vórtices y algunas veces esquinas muertas donde la disolución es extremadamente lenta o totalmente incompleta.

Cuando es posible, también se procura ubicar la posición de la salida de forma tal que permita, forzar al hierro a una cierta circulación sobre la aleación antes de alcanzar la salida, esto se logra por acomodo de la dirección de la salida un tanto contrapuesta, pero aún paralela con la entrada y en otros casos en ángulo o cruzados.

La forma geométrica y posición de la cámara de reacción no influye en la metodología para determinar otros parámetros que son indispensables para la construcción de la misma. Con relación a la altura de la cámara, se puede decir que la disolución de la aleación es menos uniforme a medida que la profundidad de la cámara aumenta.

La cámara cilíndrica en la parte superior del molde con entrada y salida tangencial al área de la sección del cilindro, presenta la desventaja de que durante el moldeo y para la introducción del nodulizante se hace necesario un volteo doble de los moldes, lo que hace más lento el proceso tecnológico de moldeo. Se puede encontrar solución si se practica un orificio justo encima de la cámara para la introducción del nodulizante que puede ser taponado después con un macho para evitar la oxidación del producto.

Este tipo de cámara tiene la ventaja de que arrastra y disuelve todo el nodulizante. En las pruebas realizadas no se realizó el control de la granulometría, fue utilizada la original del NODULANT II y no presentó dificultad en su disolución. El contenido de magnesio residual logrado está por debajo del requerido a pesar de que fue realizado

el cálculo de la cantidad de magnesio a introducir. De esto se deduce que se debe realizar el estudio de la granulometría del nodulizante como otro de los factores que influyen en el proceso.

La cámara cilíndrica en el semimolde superior garantiza el mejor nivel de solubilidad del nodulizante y se obtienen valores superiores de resistencia a la tracción en comparación con las otras cámaras analizadas. Sin control de la granulometría ni el volumen de la cámara, se obtuvo para este tipo de cámara con el NODULANT II un hierro con grafito esferoidal de la marca 400-12 según la norma ISO (internacional). La cual dispone los parámetros necesarios para la producción de hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal.

Los pasos a seguir para la construcción de la cámara de reacción se pueden resumir de la siguiente forma: diseño del sistema de alimentación, determinar el volumen del sistema de alimentación y determinar la masa de la pieza.

Luego se determina el tiempo de vertido de acuerdo a la masa de la colada y al sistema de vertido de la planta. Este puede ser calculado por las recomendaciones de (Dunks, 1976) cuando por primera vez se realiza este proceso se recomienda un factor de solución de  $0,069 \text{ Kg/s/cm}^2$ . El siguiente paso consiste en encontrar el área de solución de la cámara.

Los siguientes pasos se utilizan para determinar la profundidad o altura de la cámara de reacción. Una vez seleccionada la aleación nodulizante que se empleará, se determina la cantidad de aleación a introducir en el molde y con esto se calcula el volumen de la aleación. Se determina la profundidad de la aleación en la cámara. Finalmente se determina la altura de la cámara ( $H_c$ ).

La altura de la cámara se elige en dependencia del volumen de la misma, el cual se debe determinar en dependencia del parámetro de la cámara ( $K$ ) que se expresa por la relación mostrada en la ecuación (1.7) (Dunks, 1976).

$$K = \frac{V_n}{V_c} \tag{1.7}$$

Donde:

K: parámetro de la cámara

Vn: volumen que ocupa el nodulizante, cm<sup>3</sup>

Vc: volumen de la cámara, cm<sup>3</sup>

## **1.2 Antecedentes del vertido vibratorio en la obtención de fundidos de metales ferrosos y no ferrosos**

La idea de los tratamientos con vibroimpulso del metal durante el endurecimiento de los lingotes es conocida hace mucho y era propuesta por (Chernov, 1950). Pero a pesar de las grandes ventajas de calidad que propician los tratamientos vibratorios, no ha sido propagado de manera universal, aunque un prestigioso grupo de científicos ucranianos encabezados por Alexey Nikolaevich Smirnov, han incursionado en este campo desde la Universidad Nacional de Donetsk, con grandes resultados que han sido aplicados en la industria metalúrgica y sideromecánica de esta región.

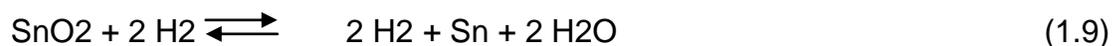
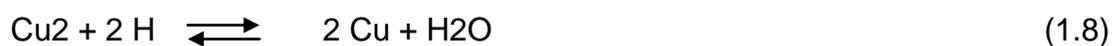
También se destacan otras investigaciones relacionadas con la producción de lingotes de acero de laminación de alta calidad, obtenidos por tratamientos con vibraciones, la producción de lingoteras para lingotes de acero de laminación con mayor durabilidad también logradas bajo las influencias vibratorias. Además de la aplicación de estos tratamientos a lingotes, fundidos de aluminio y sus aleaciones, aleaciones de cobres, con mucho éxito tecnológico en cuanto a la calidad física sin rechupes y la eliminación de los poros y sopladuras con un gran mejoramiento de las propiedades químicas y mecánicas.

Cuba ha sido el otro receptor de las recomendaciones del padre de la metalurgia Chernov y especialistas del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Holguín en coordinación con las Empresas Fundidoras del MINDUS. Con gran éxito se han realizado investigaciones conjuntas y se ha aplicado el vertido dinámico en producciones de artículos de aleaciones de aluminios, aleaciones de cobre con menor rechupe y libres de poros y sopladuras, y en la obtención de fundidos de hierro de alta resistencia con grafito esferoidal por el método de vertido dinámico.

Sánchez (1995) aplicó el tratamiento con vibraciones en los bancos de coquillas de la Fábrica de Cafeteras del EIMPUD, uniendo la estructura metálica de los bancos de coquillas del vaso inferior, vaso superior y la tapa de las cafeteras KUPRES al pedestal metálico del electromotor que energiza los cilindros neumáticos para aprovechar las vibraciones que el mismo trasmite.

Con una frecuencia de vibración de 40 Hz con cuatro calzos de gomas en las patas de los bancos según el torque de los tornillos de anclaje, de esta manera se aplicó el vertido vibratorio, logrando aumentar el copiado de la cavidad interior del molde metálico, disminuir el espesor de las paredes de las cafeteras, aumentando la estanqueidad, disminuyendo la norma de consumo de aluminio y ahorrando los portadores energéticos durante su explotación, por permitir un calentamiento más rápido.

Sánchez (1998) utilizó el vertido dinámico en la disminución del rechupe en fundidos de Br en la DIFAE, Planta Mecánica, disminuyendo el consumo de chatarra de Br al ser menor el tamaño de las mazarotas. En la Fundición Acero Hierro de Holguín, Sánchez (1998) establece una tecnología de vertido vibratorio que permite la disminución de los poros y sopladuras de los fundidos de cuproaleaciones, valorando la particularidad que el cobre y los metales aleantes al reaccionar con el hidrógeno, se forma metal libre más vapor de agua, según las siguientes reacciones:



Lo cual trae como consecuencia que no se puedan obtener fundidos libres de poros y sopladuras por métodos de fundición, debido a que los vapores de agua quedan dentro del caldo metálico, generando poros que aumentan de la periferia al centro, según Sánchez (2011).

El encarecimiento de los procesos de fundición producto de la aparición de poros y sopladuras por la presencia de vapor de agua y la variación de la densidad, se eliminaron en una rampa de chapas y vigas de acero de 4 000 x 4 000 mm

con un vibrador ensamblado en el centro y seis patas de 300 mm de altura con muelles, la cual es mostrada en la figura 1.1.



Figura 1.1. Rampa dinámica vibratoria Fuente Sánchez (2011).

Con el vibrador se aplican las cargas dinámicas tecnológicamente exigidas a la rampa, sobre la cual se realiza el vertido 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>, entre otros.)

### **Conclusiones del capítulo**

1. Del estudio bibliográfico y de las consultas con los que investigan este tema, podemos concluir que el tratamiento con vibraciones está orientado a dos regiones geográficas principales: Ucrania y Cuba
2. La aplicación del tratamiento con vibraciones para el aumento de la calidad de los lingotes y fundidos ha sido investigado ampliamente por la Universidad Técnica Nacional de Donetsk en coordinación con las grandes empresas metalúrgicas de esa cuenca siderúrgica, principalmente para la producción de lingotes de acero de laminación, lingoteras y fundidos de hierro, lingotes y fundidos de aleaciones de aluminio y cuproaleaciones

3. El Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Holguín en coordinación con las empresas fundidoras ha obtenido resultados satisfactorios en cuanto al aumento de la calidad de fundidos
4. No se evidencia la utilización del tratamiento con vibraciones en ninguna investigación, para la eliminación de poros, sopladuras e inclusiones no metálicas en la obtención de hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal.
5. No existe ningún trabajo encaminado al establecimiento de los parámetros de vibración (Frecuencia y amplitud) en la obtención de hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal.

## **2 MATERIALES Y MÉTODOS**

Para dar cumplimiento al objetivo de esta investigación y poder determinar los parámetros vibratorios (amplitud y frecuencia), en el presente capítulo se exponen los aspectos fundamentales de la metodología de cálculo de los parámetros para la obtención de hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal en el proceso “in mold” por el método de vertido vibratorio, establecida por Savón (2015) en el taller de fundiciones ferrosas de la Empresa Mecánica de Holguín “Héroes del 26 de Julio”. Se describe de manera exhaustiva los diferentes elementos y variables que componen esta metodología.

### **1.3 2.1 Metodología de cálculo de los parámetros para la obtención de hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal en el proceso “In mold” con el método de vertido vibratorio**

La metodología de cálculo de los parámetros para la obtención de hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal por el proceso “in mold” con el método de vertido vibratorio, constituye un aspecto importante el taller de fundiciones ferrosas de la Empresa Mecánica de Holguín “Héroes del 26 de Julio”, debido a que permite el cálculo y análisis. Según Savon(2015), esta metodología facilita la determinación de un conjunto de variables que inciden directamente en el proceso productivo y define la calidad del producto final.

Generalmente nos encontramos con dos situaciones típicas con el cliente. En unos casos, el cliente sólo dispone de una muestra física de la pieza acompañada de requerimientos adicionales, por lo que es necesario el diseño en 3D del mismo. En otros casos, el cliente proporciona el modelo en 3D de la pieza (o piezas) con sus respectivos requerimientos. En ambas situaciones, el equipo de Ingeniería del taller de fundiciones ferrosas de la empresa Mecánica de Holguín “Héroes del 26 de Julio” realiza una revisión de los datos aportados por el cliente.

Una vez que se tiene consenso con los datos, se pasa al cálculo de diferentes parámetros tecnológicos y a la elaboración de la tecnología correspondiente. Al igual que en el paso anterior, se realiza un chequeo en equipo de los resultados obtenidos. Este paso da lugar a la fabricación del herramental tecnológico necesario para producir la pieza (o piezas) en cuestión, con su respectiva comprobación.

La prueba del herramental tecnológico constituye un paso importante en este flujo, pues es el que garantizará las exigencias técnicas del cliente. Las modificaciones a este herramental pueden provenir desde el cliente, hasta las correcciones tecnológicas necesarias, que implican diferentes decisiones. Luego se produce la serie cero y si es satisfactoria, se entrega al departamento de producción el herramental tecnológico obtenido.

Como se observa, el proceso productivo pasa por diferentes etapas o procesos dentro del flujo productivo. En cada caso, existen diferentes variables que inciden en la toma de decisiones relacionadas con la Ingeniería para la obtención del hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal por el proceso "In mold" y el método de vertido vibratorio.

Desde el punto de vista tecnológico, para el cálculo de los parámetros en la obtención de hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal por el método "In mold" se utiliza la metodología aplicada por Sánchez (2007) en el taller de fundiciones ferrosas de la empresa Mecánica de Holguín "Héroes del 26 de Julio" la cual se expresa en cuatro etapas (figura 2.2).

A continuación se describen según Sánchez (2007) los aspectos fundamentales que forman parte de cada paso o etapa de la metodología expresada en la figura 2.2.



Figura 2.2. Etapas fundamentales en la metodología para el método "In mold".

### 2.1.1 Diseño de la cámara de reacción

Del diseño adecuado de la cámara de reacción dependen otros parámetros que definen la formación del grafito esferoidal durante la modificación, como lo son la velocidad de disolución de la aleación, el factor solución, peso total de la colada.

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 (2.1) Dunks (1976)

$$M_{an} = \frac{M_{fm} \cdot K [(\% S_{cmb} \cdot 0,76) + M_{grd}] \cdot 100}{(100 - P_{fMg}) \cdot \% M_{ga}} \text{ (kg)} \quad (2.1)$$

Donde:

$M_{an}$ : es la masa de la aleación nodulizante en kg

$M_{fm}$ : es la masa del fundido a modificar en kg

$K$ : es el coeficiente de pérdidas en el sistema de alimentación y la cámara de reacción, mostrado en la tabla 2;

$\%Scmb$ : es el porcentaje de azufre en el caldo metálico base en %

$\%Mgrd$ : es el magnesio residual deseado en %

$\%$ ;  $PfMg$ : es la pérdida por fusión del  $Mg$  en %;

$\%Mga$ : es el porcentaje de  $Mg$  en la aleación nodulizante en %

### 2.1.2 Cálculo del peso de la pieza

Para calcular el peso de una pieza se comienza por dividir el plano de la pieza fundida en figuras geométricas a las cuales se les calcula el volumen, para lo cual se utiliza la fórmula para determinar superficies, volumen y espesor equivalente de los cuerpos. Una vez calculado el volumen de las figuras geométricas en que fue dividida la pieza, se suman obteniéndose el volumen total de la misma pieza. A partir del volumen obtenido, se determina la masa de la pieza de acuerdo a la relación expresada por (2.2). Tartera (2004)

$$M_{fm} = V_{fm} \cdot \delta \quad (2.2)$$

Donde:

$M_{fm}$ : es la masa del fundido a modificar en kg

$V_{fm}$ : es el volumen del fundido en  $\text{cm}^3$

$\delta$ : densidad de la fundición con grafito esferoidal que es  $7,1 - 7,6 \text{ g/cm}^3$ , la investigación considera una marca con una densidad ( $\delta$ ) de  $7,35 \text{ g/cm}^3$ .

Silidwork (2014).nos permite obtener la masa de la pieza a partir de las propiedades físicas, que para el caso de la presente investigación es de  $6,2 \text{ kg}$

### Observaciones:

El peso específico de la fundición aumenta con la disminución del contenido de grafito, con la disminución del contenido de silicio y aluminio, 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 nos 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.

Si se efectúa realiza la tecnología asistida por computadora, una vez diseñada la materia prima se busca el valor de la masa en las propiedades mecánicas. El coeficiente K que incluye la pérdida del metal en el sistema de alimentación y la cámara de reacción, se determina por la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Coeficiente de pérdidas del sistema de alimentación y mazarotas (K).

Fundición gris	Fundición esferoidal		Acero
	Modificación en cazuela	Modificación en "in Mold"	
1.21	1.21	1.3	1.4

De la tabla 2.1 se selecciona el  $K = 1,95$  para la modificación en "In Mold".

### 2.1.3 Porcentaje de azufre en el caldo metálico base +Scmb

La composición química del caldo metálico base es C - 3,26 %; Si - 2,4 %; Mn - 0,51 %; P - 0,12 %; S - 0,03 %, de donde  $\%Scmb = 0,03$  %.

#### 2.1.4 Determinación del magnesio residual deseado

Para la aplicación del proceso “in Mold” es indispensable el conocimiento del nivel del magnesio residual deseado que debe quedar entre 0,035 y 0,05 % para garantizar que todo el grafito sea esferoidal. Para este caso de investigación se toma 0,04 % por dos motivos: es una cifra promedio y es el porcentaje contenido en las coladas tradicionalmente.

#### 2.1.5 Pérdida por fusión del magnesio

La investigación realizada por Davis et al (1990) han demostrado que en el proceso “in Mold” la eficiencias del magnesio e igual o mayor al 80 % y en estudios realizados por Chinguis (1980) precisan que la pérdida por fusión en el proceso “in Mold” es de un 20 %, por lo que ambos investigadores coinciden y se asume que perdida por fusión del magnesio es un 20 %.

#### 2.1.6 Porcentaje de Mg en la aleación nodulizante

Esta investigación emplea como aleación nodulizante el NODULANT II (Mg 5 %, Si 45 %, Ca 2 %, Al 3 %, Fe 40 % y M.T.R. el resto). De donde el porcentaje de Mg es 5 %.

Sustituyendo los valores en (1) obtenemos (3)

$$M_{an} = \frac{6,2 \cdot 1,95[(0,03 \cdot 0,76) + 0,04] \cdot 100}{(100 - 20) \cdot 5} = \frac{75,9252}{400} = 0,189813 Kg \quad (2.3)$$

Conociendo de la expresión (2.3) la masa de la aleación nodulizante y la densidad de la aleación, determinamos el volumen de la aleación nodulizante conforme a la expresión Tartera (2002).

$$V_a = \frac{M_{an}}{\rho} \quad (2.4)$$

Donde:

$V_a$ : es el volumen de la aleación en  $cm^3$ .

$M_{an}$ : es la masa de la aleación nodulizante en g.

$\rho$  : es la densidad de la aleación nodulizante en  $\text{g/cm}^3$ .

Desarrollando (2.5) se determina la masa de la aleación nodulizante en g.

$$M_{an} = 0,189813 \cdot 1000 = 189,98 \text{ g} \quad (2.5)$$

La aleación nodulizante usada es el NODULANT II con una densidad de  $3,25 \text{ g/cm}^3$  para la granulometría de 2,5 mm.

Sustituyendo en (2.4) se obtiene (2.6).

$$V_a = \frac{189,98}{3,25} = 58,45 \text{ cm}^3 \quad (2.6)$$

Luego se determina el volumen de la cámara. El volumen de la cámara de reacción debe ser el óptimo y para su cálculo se tiene en cuenta el volumen de la aleación nodulizante y el parámetro de la cámara de nodulización ( $F$  : 0,6 – 0,8). Bajo las condiciones del taller de fundición acero-hierro,  $F$  es de 0,8.

Conociendo que el volumen de la aleación nodulizante es de  $58,45 \text{ cm}^3$ , se determina el volumen de la cámara ( $V_c$ ) según la expresión (2.7).

$$V_c = \frac{V_a}{F} \quad (2.7)$$

Donde:

$V_c$  : es el volumen de la cámara ;

$K = \frac{V_a}{V_c}$  : parámetro de la cámara bajo las condiciones del Taller FAH es 0,7.

Sustituyendo en (2.7) se obtiene (2.8).

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

A continuación se realiza el cálculo de la masa de la cámara con (2.9).

$$M_c = V_c \cdot \rho_e \quad (2.9)$$

Donde:

$M_c$ : es la Masa de la cámara de reacción.kg

$V_c$  : es el Volumen de la cámara en  $\text{cm}^3$ .

$\rho$ : es la densidad del hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal igual a  $7,35 \text{ g/cm}^3$ .

$$V_c = 83,5 \cdot 7,35 = 613,73 \text{ g} = 0,61 \text{ kg}$$

El siguiente paso consiste en encontrar el área de solución de la cámara de reacción que es otro factor importante en la nodulización de acuerdo a la expresión (2.10).

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

Donde:

$A_s$  : area de solución de la cámara de reacción en  $\text{cm}^2$ .

$V_v$  : es la velocidad de vertido en kg/seg.

$F_s$  : es el factor solución kg/ seg.cm.

Resultante de las investigaciones de Dunks se recomienda tomar como factor solución  $0,069 \text{ kg/ seg.cm}$ .

La velocidad de vertido se determina de acuerdo a la expresión (2.11).

$$V_v = \frac{M_p \cdot B}{T_v} \quad (2.11)$$

El tiempo de vertido ( $T_v$ ) se considera uno de los problemas más complejos, para su cálculo en piezas de fundición gris, se utiliza la expresión (2.12).

$$T_v = S \sqrt{M_p \cdot B} \quad (2.12)$$

Donde:

$S$  : es el Coeficiente que se obtiene por la tabla 3.

$B$  es el Coeficiente que incluye la pérdida del metal en sistema de alimentación y mazarotas y se determina por la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Magnitud del coeficiente  $S$  para fundición gris.

Espesor medio de la pared (mm)	$\leq 10$	10 - 20	20 - 40	$\geq 40$
Valor del Coeficiente $S$	1,0	1,3	1,5	1,7

El espesor medio de la pared  $\delta$  se calcula sumando todos los espesores de pared y dividiéndolo entre la cantidad de espesores de pared como indica expresión (2.13). Dunks (1976).

$$\delta = \frac{1 + 2 + 3 \dots n}{n} \quad (2.13)$$

La investigación Savón (2015) usa probetas de fundición según la norma internacional ASTM A 536 84 (Reaprobada en 1999), donde los espesores son 25 y 54 mm, utilizando estos valores en (2.13) se obtiene el valor del espesor medio de la pared con (2.14).

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

Entonces con un valor medio de pared de 52 mm la magnitud del coeficiente  $S$  indicado en la tabla 2.2 es de 1,5. palsmado estos valores en (11) se determina el  $T_v$  en (2.15).

$$T_v = 1,5 \sqrt{6,2 \cdot 1,95} = 5,22 \text{ seg} \quad (2.15)$$

Sustituyendo en (2.15) se establece (2.16). Sustituyendo en (2.10) se determina el área de solución la cámara de reacción con (2.16).

$$V_v = \frac{6,2 \cdot 1,95}{5,22} = 2,42 \text{ Kg / seg} \quad (2.16)$$

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

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

$$D_{cr} = 2 \cdot \sqrt{\frac{A_s}{\pi}} \quad (2.18)$$

Donde:

$D_{cr}$ : es el diámetro de la cámara de reacción en cm.

$A_s$ : es el área de solución la cámara de reacción en  $\text{cm}^2$ .

$$D_{cr} = 2 \cdot \sqrt{\frac{35,07}{3,1416}} = 2 \cdot 11,163 = 6,68 \text{ cm} = 66,8 \text{ mm}$$

Una vez determinado el volumen de la aleación nodulizante y el área de solución de la cámara de reacción, se calcula la altura de la aleación en la cámara ( $H_a$ ) por la expresión (2.19).

$$H_a = \frac{V_a}{A_s} \quad (2.19)$$

Donde:

$H_a$ : es la altura ocupada por la aleación nodulizante en la cámara de reacción en cm;

$A_s$ : es el área de solución de la cámara de reacción en  $\text{cm}^2$ .

$V_a$ : es el volumen de la aleación nodulizante en  $\text{cm}^3$ .

Sustituyendo en (2.19) determinamos  $H_a$  en (2.20).

$$H_a = \frac{58,45}{35,07} = 1,67 \text{ cm} \quad (2.20)$$

La altura de la cámara de reacción ( $H_c$ ) define la esferoidización del grafito y se calcula según la expresión (2.21).

$$H_c = H_a + (1 - 2) \quad (2.21)$$

Donde:

$H_c$ : es la altura de la cámara de reacción en cm.

$H_a$ : es la altura de la cámara de reacción en cm.

Se sustituye el valor de  $H_a$ , además se toma como promedio 1,5 cm en (2.21) y en (2.22) queda determinada la altura de la cámara.

$$H_c = 1,67 + 1,5 = 3,17 \text{ cm} \quad (2.22)$$

### 2.1.7 Diseño del sistema de alimentación

El diseño del sistema de alimentación para la obtención de piezas con estructura de grafito esferoidal debe ser óptimo, 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. Se inicia con el cálculo del área mínima del sistema de alimentación utilizando la ecuación (2.23) recomendada por Goyos (1991).

$$\sum F_{\text{alimentadores}} = \frac{K \cdot M_p}{\mu \cdot T_v \cdot 0,31 \cdot \sqrt{H_m}} \quad (2.23)$$

Donde:

$K$ : es el coeficiente que incluye la pérdida del metal en el sistema de alimentación y mazarotas, se determina por la Tabla 2.2 y es igual a 1,95.

$M_p$ : es la masa de la pieza en kg ya calculada en (2.2) igual a 6,2 kg.

$\mu$ : es el coeficiente que incluye la resistencia del sistema de alimentación al paso de metal y se determina por la tabla 2.3 .

$T_v$ : es el tiempo de vertido en segundos que determinado en (2.15) es igual a 5,91 s.

$H_m$ : presión metalostática media.

La tabla 2.3 relaciona el valor del coeficiente que incluye la resistencia del sistema de alimentación al paso de metal (Goyos,1991).

Tabla 2.3. 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

De la tabla 2.3 obtenemos que  $\mu$  para el desarrollo de nuestro trabajo es de 0,32.

La presión metalostática se calcula teniendo en cuenta los parámetros mostrados en la figura 2.3.

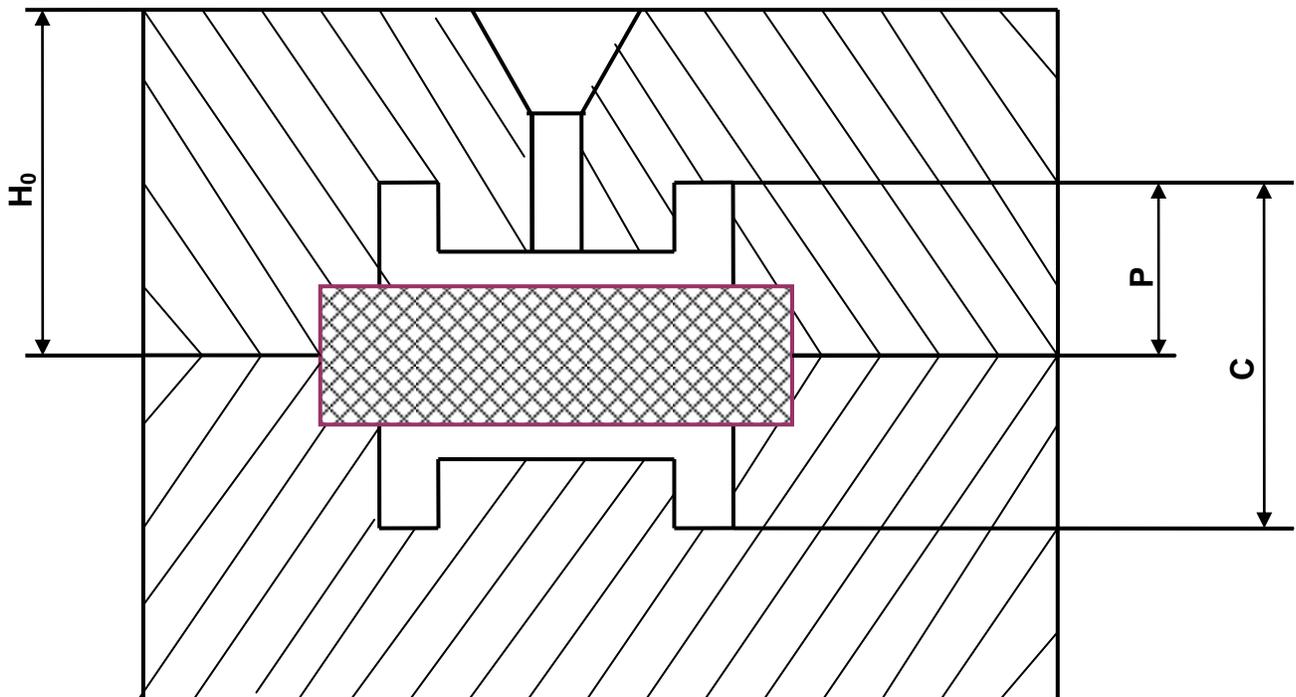


Figura 2.3. Valores de  $H_0$ ,  $p$  y  $C$ .

La presión metalostática ( $H_m$ ) se determina por la expresión (2.24) cuando el vertido es por encima  $p = 0$  y  $H_m = H_0$ , se determina:

Para el caso de la investigación la altura de la caja superior es 200 mm y la pieza se obtiene en la caja inferior por eso  $H_m := H_0 = 200$  mm. La investigación utiliza la norma internacional ASTM A 536 – 84 (Reaprobada, 1999). Para el modelo de las probetas de fundición, que muestra la figura 2.4 y 2.5.

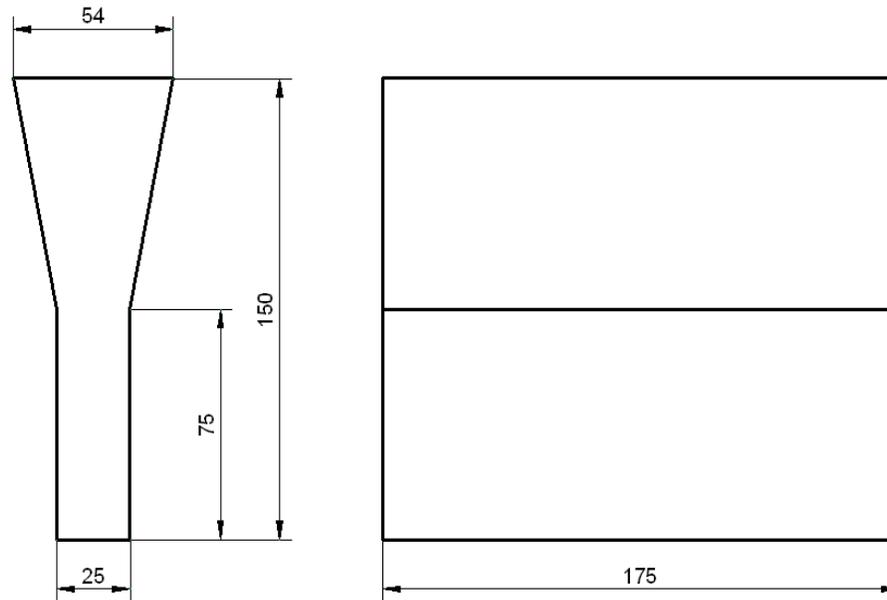


Figura 2.4. Bloque en Y según norma ASTM A537 -84 para la extracción de muestra para ensayos mecánicos.

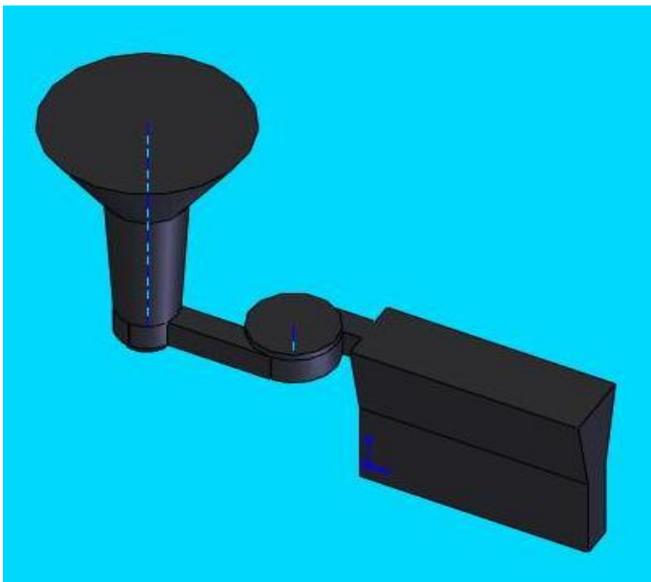


Figura 2.5. Bloque en Y según norma ASTM A537 -84 para la extracción de muestra para ensayos mecánicos.

Sustituyendo en (2.18) se determina área mínima del sistema de alimentación en (2.25).

$$\sum F_{\text{alimentadores}} = \frac{1,95 \cdot 6,2}{0,32 \cdot 5,22 \cdot 0,31 \cdot \sqrt{200}} = 1,65 \text{ cm}^2 \quad (2.25)$$

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 (2.26).  $\sum F$  alimentador de la pieza: F alimentador de la cámara: F tragadero. 1:1.12:1.134:1.136

Sustituyendo se obtiene (2.27).

$$1,65: 1,85:1,871 \quad (2.27)$$

Figura 2.5



En la tabla 2.4 se muestran los elementos del sistema de alimentación.

No	Elementos del sistema de Alimentación	Dimensiones		
		a	b	H
1	F alimentador de la pieza	16	11.5	12
2	F alimentador de la cámara	17.5	13.5	12

Tabla 2.4. Elementos del sistema de alimentación (mm).

El área del tragadero regula la efectividad del llenado de los moldes y el resultado de la obtención de la estructura esferoidal y calcula el diámetro (Dtr) según la expresión (2.28).

$$D_{tr} = 2 \cdot \sqrt{\frac{F_t}{\pi}} \quad (2.28)$$

Donde:

$D_{tr}$  : es el diámetro del tragadero en  $cm^2$ ;

$F_t$  : es la sección del tragadero  $cm^2$ .

Se sustituye en (2,28) el área del tragadero determinada en (2.27) y en (2.29) y se obtiene  $D_{tr}$  . La taza de vertido garantiza el llenado continuo del tragadero y se obtiene por la relación (2,30) y (2,31).

$$D_{tr} = 2 \cdot \sqrt{\frac{1,871}{3,1416}} = 2 \cdot 0,772 = 1,54 \text{ cm}^2 = 15,4 \text{ mm} \quad (2.29)$$

$$D_b = 3 \cdot D_{tr} \quad (2.30)$$

Donde:

$D_b$  : es el diámetro superior de la taza de vertido. mm

De (2.30) en (2.31) se calcula  $D_b$  .

$$D_b = 3 \cdot 15,4 = 46,2 \text{ mm}$$

(2.31)

La altura de la taza ( $H_b$ ) es igual al diámetro de la taza, lo que implica que es igual a 46,2 mm. Las dimensiones del tragadero, se seleccionan por tabla Osann

La fusión del hierro gris para ser modificado a hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal se puede realizar en hornos de arco eléctrico directo e indirecto, hornos de inducción, hornos de crisol, horno de cubilote.

Esta investigación se realiza bajo condiciones industriales en el horno de cubilote de 700 mm de diámetro interior del taller de fundiciones ferrosas de la empresa Mecánica de Holguín "Héroes del 26 de Julio".

Este tipo de fusor debido a que utiliza chatarra proveniente del Grupo AZCUBA, ricas en azufre, propician un caldo metálico con alto contenido de azufre que es el principal demodificador del metal líquido nodulizado, por lo que necesita una desulfuración intermedia para poderlo utilizar en la obtención de hierro gris de alta resistencia con

grafito esferoidal y de esta forma demostrar con mayor fuerza criterial la hipótesis planteada para el cumplimiento del objetivo, para lo cual se desarrolla metodología según Sánchez (2007).

### 1.42.2 Diseño del experimento

Para la determinación de la relación existente entre el régimen de vibración y la estructura nodular obtenida se desarrolló un diseño de experimento factorial tipo  $3^2$ . En la realización de este experimento los parámetros que influyen quedan distribuidos de la siguiente manera:

- Parámetros prefijados: composición química del metal base y de la prealeación, granulometría, temperatura de vertido, frecuencia de vibración.
- Parámetros calculados: tiempo de vertido, velocidad de vertido, área de la cámara de reacción, volumen de la cámara de reacción, cantidad de aleación nodulizante.
- Variable a investigar: amplitud de vibración.

Las variables consideradas en la investigación se muestran en la tabla 2.5.

Tabla 2.5. Variables consideradas en la investigación.

Variable	Tipo de variable	Medida
Frecuencia de vibración	Independiente	65, 70, 75 Hz
Amplitud de vibración	Independiente	2, 3, 4 mm.
Temperatura de vertido	Independiente	1450 °C
Masa de aleación nodulizante	Independiente	189,98 g
Diámetro máximo de los nódulos	Dependiente	(Mk)
Resistencia a la tracción (Rm)	Dependiente	Resistencia a la tracción

En la tabla 2.6 se incorporan los tratamientos aplicados en el experimento.

Tabla 2.6. Tratamientos aplicados en el experimento.

F1,A1Man1, Tv1;	F2,A1Man1, Tv1;	F3,A1Man1, Tv1;
F1,A2Man1, Tv1;	F2,A2Man1, Tv1;	F3,A2Man1, Tv1;
F1,A3Man1, Tv1.	F2,A3Man1, Tv1.	F3,A3Man1, Tv1.

Donde:

F: frecuencia de vibración; Hz.

A - amplitud; mm

Man – masa de aleación nodulizante; g

Tv – temperatura de vertido, s.

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

Se colocaron los moldes sobre la rampa vibratoria (figura 2.6), compuesta de chapas y vigas de acero de 630 x 250 mm, con un vibrador electromagnético ensamblado en el centro y cuatro resortes de 300 mm de altura, como soportes.



Figura 2.6 Rampa vibratoria

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

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

### **2.2.1 Preparación y ensayo de las muestras**

Las muestras fueron preparadas y cortadas con longitud de 15 X 15, según la norma ASTM E - 92, las que fueron sometidas a un proceso de desbaste en un torno universal con refrigerante para evitar variaciones en su microestructura; luego fueron pulidas, de manera progresiva, con lijas de granos desde 150 hasta 800. mm de forma automática y manualmente. Fueron atacadas químicamente con una solución química de nital la cual se utiliza para este tipo de ensayo al 5 % y observadas, antes del ataque, en el Metallurgical Microscope NJF – 120 A instrumentación manual (figura 2.7)



Figura 2.7 Microscopio metalúrgico NJF – 120 A

Las fotos se efectuaron en un microscopio marca NOVEL a 200x de aumento con una cámara marca CANON de 8 MPi (figura 2.8), en todas las muestras se obtuvo un

diámetro máximo de los nódulos de 40 hasta 60 micrones en una matriz ferrítica, se incorpora en las figuras 3, 4 y 5 los resultados de las muestras 01, 14 y 18 por obtenerse con diferentes regímenes vibratorios.



Figura 2.8 Microscopio NOVEL a 200x

Con la utilización del vertido vibratorio y con la variación de las variables amplitud (2, 3 y 4 mm) y frecuencia de vibración (65, 70 y 75 Hz) se desea obtener fundidos de hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal de una manera sustentable, se eliminan los poros, sopladuras e inclusiones no metálicas y el ángulo de rechupe estableciéndose lineal igual a  $180^{\circ}$  cumpliendo con las normas que rigen este tipo de producción a nivel internacional.

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

Luego de aplicar esta metodología se obtienen 18 probetas a las cuales se le realiza la determinación de la dureza (HB) (figura 2.9) y la resistencia a la tracción (Rm) y elongación (A) (figura 2.10) y estudio radiográfico.

### **Ensayo para determinar la dureza**

En la realización del ensayo de dureza, fue aplicada una carga durante 10 s, y se obtuvo la medida dos diámetros de la huella a ángulos rectos, con una aproximación de 0.1 mm, estimados hasta 0.05 mm y promediados hasta 0.05 mm Para determinar

la dureza se aplicó una carga de 500 kg a una superficie plana de la probeta bajo prueba mediante un balín duro de diámetro especificado. El diámetro promedio de la huella del balín se usó como base para el cálculo del número de dureza. El cociente de la carga aplicada entre el área de la superficie de la huella, que se supone es esférica se llama número de dureza Brinell.



Figura 2.9 Durometro (HB)10205.

### **Ensayo para determinar la resistencia a la tracción y elongación**

Para realizar el ensayo de la elongación, los extremos de la probeta fracturada fueron unidos cuidadosamente y la distancia entre las marcas de calibración se midieron con una aproximación de 0.23 mm, mediante una escala. El alargamiento es el aumento en la longitud de la longitud calibrada expresado como un por ciento de la longitud calibrada original.



Figura 2.10 Máquina universal de tracción-compresión. (Extensómetro)

### **Conclusiones del capítulo**

- Las características tecnológicas del fundido de hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal avalan su empleo como sustituto del hierro gris FG - 18 para su uso en la construcción de piezas de respuestos para los implementos agrícolas de la empresa mecánica héroes del 26 de julio de Holguín.
- Las técnicas empleadas para la realización de los ensayos estructurales, radiográficos y propiedades mecánicas de las muestras reúnen las especificaciones de las normas cubanas e internacionales, ISO 1083.
- La metodología empleada para la investigación permite establecer los parámetros de vibración para la obtención del hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal.

### 3 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se realiza la discusión de los resultados obtenidos aplicando el método de vertido vibratorio en la obtención de hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal, manipulando las variables frecuencia y amplitud, para lo cual se utiliza la herramienta Statgraphics plus 3.2. Mostrar y analizar los resultados de estos parámetros sobre la resistencia mecánica que permita conocer las perspectivas de utilización de estos fundidos es el objetivo fundamental de este capítulo.

#### 1.53.1 Análisis metalográfico

El análisis metalográfico realizado se empleó para la observación estructural de las muestras utilizadas producto del proceso investigativo. El procedimiento se basa principalmente en la minuciosa preparación de cada probeta a observar, pues se requieren una serie de requisitos de estricto cumplimiento. Este análisis permite obtener una visión microestructural en las muestras analizadas, el tamaño y forma de partículas predominantes en la muestra.

En la figura 3.1 se observa la muestra obtenida con un régimen vibratorio de 65 Hz de Frecuencia y 2 mm de amplitud, sin ataque químico inclusiones de grafito nodular. El área ocupada por el grafito en la estructura es más de 5 hasta 8 %. Dimensión del diámetro máximo de las inclusiones de grafito más de 40 hasta 60  $\mu\text{m}$ .



Figura.3.1.Muestra 01 con ataque químico (65 Hz y 2 mm)

En la figura 3.2 se observa la muestra obtenida con un régimen vibratorio de 70 Hz de Frecuencia y 3 mm de amplitud, con ataque químico inclusiones de grafito nodular. Área ocupada por el grafito en la estructura es más de 5 hasta 8 %. Dimensión del diámetro máximo de las inclusiones de grafito más de 40 hasta 60  $\mu\text{m}$ .

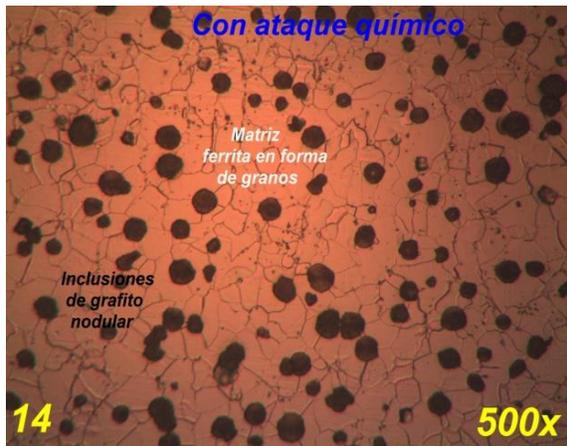


Figura.3.2. Muestra 14 con ataque químico (75 Hz y 4 mm).

En la figura 3.3 se observa la muestra obtenida con un régimen vibratorio de 75 Hz de Frecuencia y 4 mm de amplitud, sin ataque químico inclusiones de grafito nodular. El área ocupada por el grafito en la estructura es más de 5 hasta 8 %. Dimensión del diámetro máximo de las inclusiones de grafito más de 40 hasta 60  $\mu\text{m}$ .



Figura.3.3. Muestra 14 con ataque químico (70 Hz y 4 mm).

### 1.63.2 Estudio Radiográfico

El estudio radiográfico se realiza con un equipo Portátil de Rayos X tipo Y.XPO 225. Modelo Y.XPO 225 DO2, Fabricante YXLON International A.S. in Copenhagen ~Danmark, Dinamarca. Nº de Serie 64091. Designación hacer radiografía en estructuras metálicas hasta (50 mm de espesor).

Las muestras I, II, III no están comprendidas dentro de la investigación, pero si se consideran como patrón de comparación para observar los poros sopladuras, inclusiones no metálicas que se obtienen con el vertido tradicional y compararlo con las muestras 01, 14 y 18 contempladas dentro de la investigación. Se demostró con el patrón comparativo entre las muestras obtenidas cómo al emplear el vertido vibratorio se eliminan los poros y sopladuras a partir de los 65 Hz de frecuencia de vibración, hasta 75 Hz con amplitudes desde 2 hasta 4 mm como se muestra en la figura 3.4.

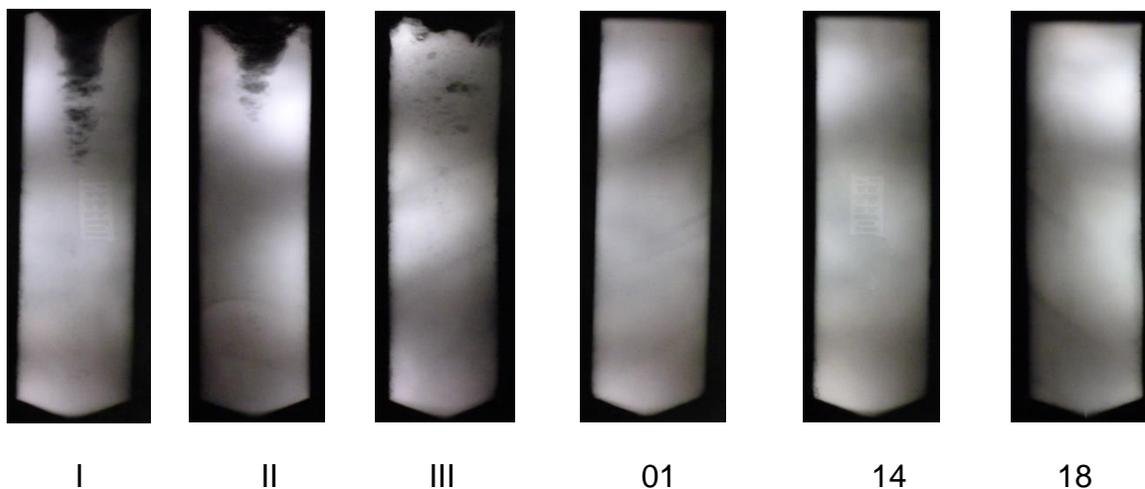


Figura 3.4. Muestras radiográficas. I II III 01 14 18

### 1.73.3 Análisis de las propiedades mecánicas

En la tabla 3.1 se incorporan las propiedades obtenidas como resultado de esta investigación donde se manifiesta que al someter el fundido a vibraciones en un

régimen que oscila desde 2 hasta 4 mm de amplitud favorece la decantación de las inclusiones no metálicas, evitando que estas se queden atrapadas en la superficie intergranular dificultando la unión de los enlaces intercrystalino, lo que disminuye así su dureza, a esto se suma además que esta vibración facilita o favorece la difusión de los gases contenido en el fundido a través de la superficie intermolecular dando como resultado también el aumento de esta propiedad.

Tabla 3.1. Propiedades resultantes de la investigación.

<b>Número</b>	<b>Resistencia a la tracción (Rm)</b>	<b>Dureza (HB)</b>	<b>Elongación (A)</b>	<b>Φ máx. nódulos (micrones)</b>
1	380	154	12	40 – 60
2	382	156	10	40 – 60
3	388	168	12	40 – 60
4	390	162	12	40 – 60
5	394	164	12	40 – 60
6	394	182	10	40 – 60
7	400	194	12	40 – 60
8	410	198	12	40 – 60
9	410	190	8	40 – 60
10	384	160	10	40 – 60
11	386	158	12	40 – 60
12	386	172	12	40 – 60
13	392	166	13	40 – 60
14	396	170	10	40 – 60
15	396	184	15	40 – 60
16	410	188	12	40 – 60
17	408	200	10	40 – 60
18	408	186	12	40 – 60

#### 1.83.4 Análisis estadísticos de los resultados

##### 3.4.1 Análisis de la varianza para la resistencia a la tracción (Rm)

En la figura 3.5 se muestra la gráfica de interacción de la resistencia a la tracción con los parámetros tecnológicos amplitud y frecuencia de vibración.

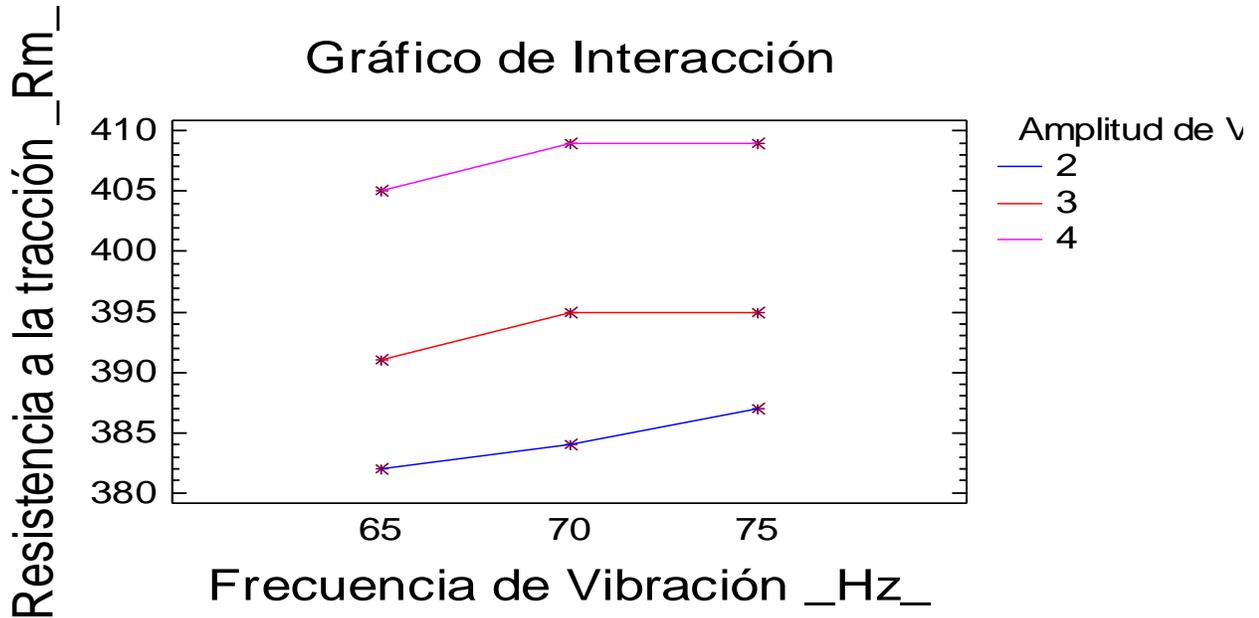


Figura 3.5. Interacción de la resistencia a la tracción con los parámetros tecnológicos amplitud y frecuencia de vibración.

En la figura 3.5 se observa cómo la resistencia a la tracción con una amplitud de vibración de 2 mm, en un rango de frecuencia de vibración a partir de 65 Hz, obtiene su comportamiento mayor a 75 Hz y al aplicarle el mismo régimen vibratorio a una amplitud de vibración de 3 mm, mejora sus valores de resistencia en las tres magnitudes de frecuencias siendo el mayor en 70 Hz.

También se demuestra cómo en el rango de amplitud de vibración de 4 mm es superior y es el más adecuado, todo lo cual cumple con la marca de Hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal 400 - 12 de la Norma ISO 1083 (Internacional) que rige esta producción en el mundo esta acorde a los resultados propuestos y obtenidos por esta investigación.

En la tabla 3.2 se muestra el análisis de la varianza para la resistencia a la tracción, donde se muestra el comportamiento del P-valor.

Tabla 3.2. Análisis de la varianza para la resistencia a la tracción

<b>Análisis de la varianza para resistencia a la tracción (Rm) Sumas de Cuadrados de Tipo III</b>					
<b>Fuente</b>	<b>Suma de Cuadrados</b>	<b>GL</b>	<b>Cuadrado Medio</b>	<b>Cociente-F</b>	<b>P-Valor</b>
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: Amplitud de Vibración	1655,11	2	827,556	95,49	0,0000
B: Frecuencia de Vi	61,7778	2	30,8889	3,56	0,0724
INTERACCIONES					
AB	6,22222	4	1,55556	0,18	0,9433
RESIDUOS	78,0	9	8,66667		
TOTAL (COREGIDO)	1801,11	17			

En la tabla 3.2 aparece el análisis de la varianza para la resistencia a la tracción, teniendo una diferencia significativa la frecuencia de vibración por tener un P-valor de 0,07. Esto es debido a que la frecuencia de vibración actúa directamente en la agitación del caldo metálico, el mismo propicia un aumento de las velocidades de enfriamiento y solidificación sobre la velocidad de desmodificación provocada por el azufre contenido en el baño.

Este régimen de enfriamiento y solidificación ocurre casi de manera simultánea, lo que influye en la disminución de la diferencia de las magnitudes de las variables de resistencia a la tracción en el intervalo obtenido.

La amplitud de vibración no tiene diferencia significativa en el análisis de varianza de la resistencia a la tracción, porque el P-valor es menor a 0,05 debido a que su variación no es determinante porque todos los valores de resistencia a la tracción son acordes a la marca 400 -12 de la normas ISO 1083 (Internacional).

### 3.4.2 Análisis de la Varianza para la elongación (A)

En la figura 3.6 se observa la gráfica de interacción de la elongación con los parámetros tecnológicos amplitud y frecuencia de vibración.

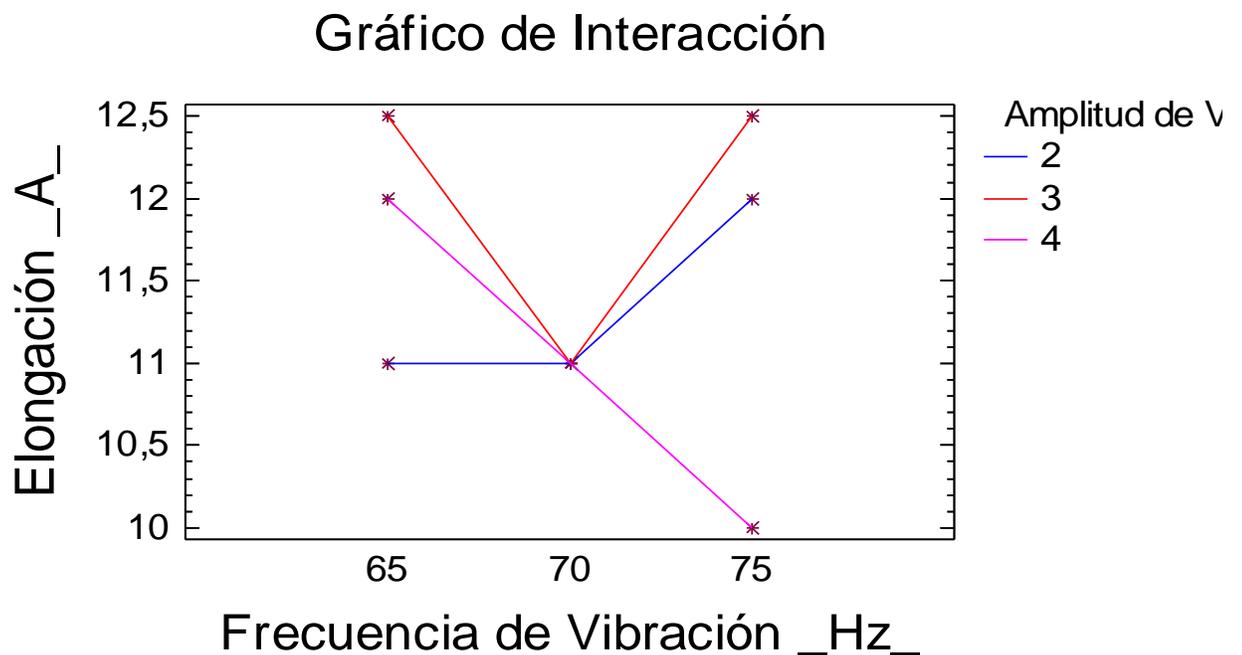


Figura 3.6. Interacción de la elongación con los parámetros tecnológicos amplitud y frecuencia de vibración.

En la figura 3.6 se muestra el comportamiento de la elongación en los puntos de 65 Hz, 70 Hz y 75 Hz de frecuencia de vibración y con tres valores de amplitud de vibración. Con el valor de 3 mm los mejores resultados se obtienen en los puntos correspondientes a 65 Hz y 75 Hz.

Con 2 mm de amplitud la mejor elongación corresponden a 75Hz, mientras con 4 mm se presenta el valor más bajo de la elongación en 75 Hz y el mayor en el punto 75. Todo esto es debido a que en esta investigación se establecieron los parámetros tecnológicos necesarios para obtener la marca 400- 12 de la norma ISO 1083 (Internacional), lo cual se ha logrado.

En la tabla 3.3 se muestran los resultados de la varianza para la elongación obtenidos utilizando como herramienta el Stagraphic plus 15.1.

Tabla 3.3. Resultados de la varianza para la elongación.

<b>Análisis de la Varianza para Elongación (A) Sumas de Cuadrados de Tipo III</b>					
<b>Fuente</b>	<b>Suma de Cuadrados</b>	<b>GL</b>	<b>Cuadrado Medio</b>	<b>Cociente-F</b>	<b>P-Valor</b>
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: Amplitud de Vibración	3,11111	2	1,55556	0,48	0,6322
B: Frecuencia de Vi	2,11111	2	1,05556	0,33	0,7289
INTERACCIONES					
AB	6,22222	4	1,55556	0,48	0,7485
RESIDUOS	29,0	9	3,22222		
TOTAL (COREGIDO)	40,4444	17			

En la tabla 3.3 aparece el análisis de la varianza para la elongación teniendo una diferencia significativa las variables frecuencia y amplitud de vibración. Esto se debe

a que las velocidades de enfriamiento y solidificación obtenidas por el tratamiento vibratorio con estas magnitudes de frecuencia y amplitud, favorecen la tendencia a lograr la casi uniformidad de los valores de elongación.

### 3.4.3 Análisis de la varianza para la dureza (HB)

En la figura 3.7 se muestra cómo la dureza con una amplitud de vibración de 2 mm y 3 mm se comporta de manera uniforme en el intervalo de 65 a 70 Hz de frecuencia de vibración, para tener un mejor comportamiento en 75 Hz. Con una amplitud de 4 mm se obtiene un mejor valor de dureza en la frecuencia de 70Hz, todos los valores cumplen con la marca 400- 12 de la norma ISO 1083 que rige esta producción en el mundo.

En la tabla 3.4 se muestra el análisis de la varianza de dureza obtenida por la herramienta Stagraphic plus 3.2.

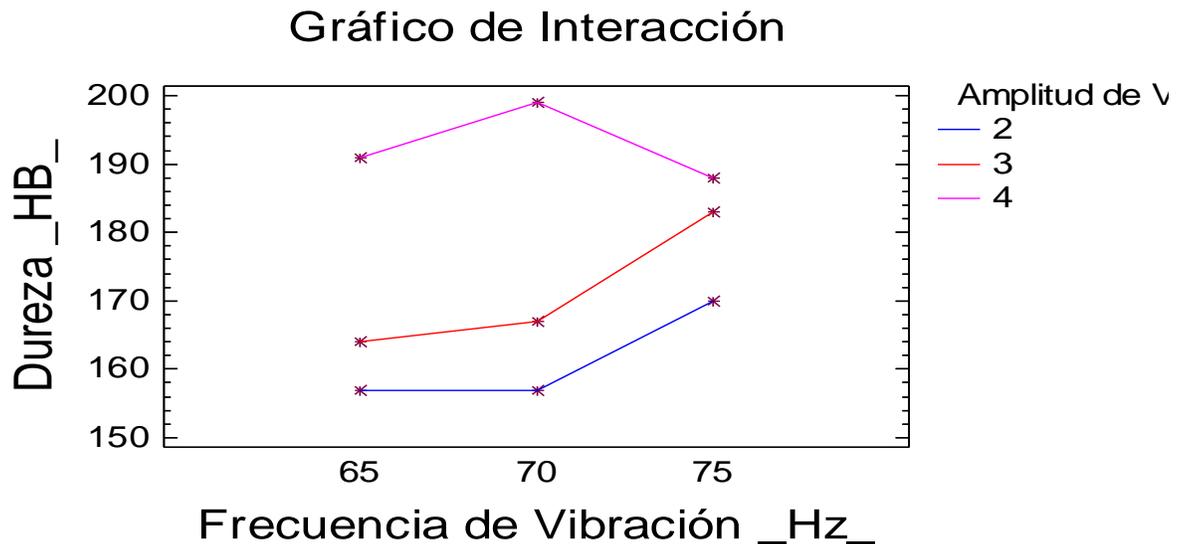


Figura 3.7. Interacción de la dureza con los parámetros tecnológicos amplitud y frecuencia de vibración.

Tabla 3.4. Análisis de la varianza para la dureza.

<b>Análisis de la Varianza para Dureza ( HB ) Sumas de Cuadrados de Tipo III</b>					
<b>Fuente</b>	<b>Suma de Cuadrados</b>	<b>GL</b>	<b>Cuadrado Medio</b>	<b>Cociente-F</b>	<b>P-Valor</b>
<b>EFFECTOS PRINCIPALES</b>					
A: Amplitud de Vibración	3073,78	2	1536,89	164,67	0,0000
B: Frecuencia de Vi	285,778	2	142,889	15,31	0,0013
<b>INTERACCIONES</b>					
AB	486,222	4	121,556	13,02	0,0009
<b>RESIDUOS</b>	84,0	9	9,33333		
<b>TOTAL (COREGIDO)</b>	3929,78	17			

Según los datos incorporados en la tabla 3.4, la amplitud y la frecuencia de vibración no ejercen diferencias significativas por tener un P-valor menor a 0,05 esto debido a que todos los valores de dureza se mueven en un intervalo correspondiente a la marca 400- 12 de la norma ISO 1083 que rige esta magnitud.

## **Conclusiones del capítulo**

Del análisis estadístico de esta investigación se concluye que:

- El mejor valor de resistencia a la tracción se obtiene con una amplitud de 4 mm y una frecuencia de 70 Hz
- Los valores mayores de elongación se obtienen en 65 Hz y una amplitud de vibración de 4 mm
- El mejor valor de dureza se obtiene en el punto de interacción de 4 mm de amplitud de vibración y 70 Hz de frecuencia de vibración
- La mejor combinación estadística para la producción de hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal es la de los parámetros tecnológicos de vibración correspondientes a 4 mm de amplitud y 70 Hz de frecuencia de vibración

## CONCLUSIONES

- En el presente trabajo quedaron establecidos los parámetros de vibración en la obtención del hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal fundamentado en que bajo estas condiciones se sugiere de una amplitud de 4 mm y una frecuencia de 70 Hz que permite obtener un hierro nodular con la resistencia mecánica establecida por la norma ISO 1083 que es la que rige este proceso a nivel nacional e internacional.
- Al obtener el hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal por el proceso “in Mold” y el método de vertido vibratorio, se obtuvo un hierro esferoidal con tamaño de nódulo 60 – 40 micrones, con una matriz ferrítica y un % de C de 3.26 lo que la ubica en un hierro hipoeutectoide.
- En la obtención del hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal los parámetros obtenidos fundamentan que el fundido obtenido presenta una resistencia a la tracción (400 RM), dureza (200 HB) y elongación (12 A).
- En el análisis establecido para 8 muestras de estudio se determinó que las muestras I, II y III establecidas como patrón de comparación con respecto a las muestras 01, 14 y 18 no presentan las mismas propiedades pues no fueron sometidas al régimen de vibración lo que valida la investigación realizada

## **Valoración Económica.**

La determinación de los parámetros tecnológicos del método de vertido vibratorio en la obtención de hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal permite de manera sustentable establecer una metodología tecnológica que permite la implementación de una línea de producción industrial de estos fundidos de manera competitiva.

## **Valoración Ambiental**

Al establecer los parámetros de vibración para la obtención de hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal se elimina el índice de rechazo por demodificación del caldo metálico, por poros y sopladuras e inclusiones no metálicas, lo que disminuye la generación de desechos sólidos y emisiones gaseosas, lográndose producciones más sustentables.

## **Valoración para la Defensa.**

Con la implementación de la tecnología derivada de esta investigación se producen códigos para la empresa mecánica de Holguín “Héroes del 26 de Julio” designados para la reparación de la técnica de combate del MINFAR

## **RECOMENDACIONES**

- Implementar de manera sustentable la herramienta obtenida para aumentar la flexibilidad y la productividad de la documentación tecnológica.
- Generalizar esta investigación y metodología en el resto de las fundiciones del País, con el objetivo de acometer a escala industrial, la producción de hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal en el proceso In Mold, y mediante el método de vertido vibratorio como sustituto del acero en la producción de semiproductos fundidos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAMOV. A. 2004 "Manual del joven fundidor". Editorial Alta Escuela.

ALEXANDOR, N. H. 1998. Control del estado del metal Líquido para la obtención de hierro con grafito esferoidal. *Liteinoe Proistbostba*. N. 3.

AREVALO V. M., SÁNCHEZ FIGUEREDO R. P. Y C. A. 2013. Entorno tecnológico alternativo para la producción competitiva, sostenible y sustentable de fundidos de cuproaleaciones densos. Repositorio Escuela Politécnica Nacional de Ecuador. <  
<http://diddigital.epn.edu/handle/123456789/1434>>

AREVALO V. M., SÁNCHEZ FIGUEREDO R. P. Y C. A. 2014. Tecnología de obtención de hierro con grafito esferoidal por el método de vertido dinámico. Revista Ciencia y futuro. Volumen 1. No.3 con ISSN 2306-823X. <  
<http://revista.ismm.edu.cu/index.php/article/viewFile/288/pdf>>

AREVALO V M. 2011. Tecnología de obtención de hierro con grafito esferoidal por el método de vertido dinámico. Revista Ciencia y futuro. Volumen 1. No.3 <  
<http://revista.ismm.edu.cu/pdf> >

AGUILAR SCHAFFER A J. 2014. Hierro Fundido. <  
<http://biblio3.url.edu.gt> .pdf>

BATISTA CABRERA, A. 1999. "Tecnología de desulfuración en Cazuela con el fin de obtener Hierro con grafito Esferoidal". Mundo Mecánico Ingeniería Mecánica. N. 3.

BATISTA CABRERA, A. 1994. "Propiedades de Fundición de los Metales y Aleaciones". Monografía, Universidad de Holguín.

BATISTA CABRERA. A. 1999. "Utilización del Magnesio como Desulfurante y su influencia en las propiedades del HGE obtenida por el método "In-mold". Mundo Mecánico. N. 2.

BATISTA CABRERA, A. 2000. "Influencia del Azufre en el rendimiento de las piezas de hierro nodular obtenida por el método "In- Mold". Mundo Mecánico N. 6.

BATISTA CABRERA, A; ORDÓÑEZ, U. 2003. "Selección de un nodulizante y forma y posición de una cámara de reacción para su aplicación para la obtención de hierro con grafito esferoidal por el método "In-mold". Ingeniería Mecánica. N. 3.

BATISTA CABRERA, A; ORDÓÑEZ, U. 2003. "Determinación de la granulometría del NODULANT II y el parámetro de la cámara más adecuados para la obtención del hierro con grafito esferoidal por el método "In-mold"". Ingeniería Mecánica. N. 3.

BATISTA CABRERA, A. 2003. "Análisis y procedimientos para la obtención de hierro con grafito esferoidal por el método "In Mold" bajo las condiciones específicas de la Industria en Cuba". Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Holguín.

BERCIANO ENRÍQUEZ J L. 2012. Universidad Politécnica de Madrid. Fabricación de fundición nodular. <[http://oa.upm.es/14450/1/Fundici%C3%B3n\\_nodular](http://oa.upm.es/14450/1/Fundici%C3%B3n_nodular.pdf)>.pdf

BOLETÍN TÉCNICO MI SR - 1 □ MI SR-2. 2001.

BASE DE DATOS .2007. [en línea], 1 de octubre <<http://www.implog.com/>>

BRIKI J; S. BEN SLIMA. 2012-01-01. Influence of Manganese Content on the Dissolution of the Iron Carbide Phase (Cementite) during a Graphitization Anneal of Spheroidal Graphite Cast Iron. Journal of Metallurgy.

<<http://scienceresearch.com> >.

CALCOSOFT. 2004. Base de Datos [en línea], <[http:// www.calcosoft.com](http://www.calcosoft.com)>

CASTLEDINE, T. J. 1998. "Experiences in the Application of the INMOLD Process to the vertically Jointed DISAMATIC Moulding System". DISA Convention.

CASTRO G.2009.f.i.u.b. adepartamento de ingenieria. Fundiciones mecánicas. <<http://campus.fi.uba.ar>>

CASTILLO DEL D F. 2007, facultad de estudios superiores cuautitlán. Hierros Fundidos.<[http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina\\_ingenieria/mecanica/mat/mat\\_mec/m6/hierro%20fundido](http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m6/hierro%20fundido)>.pdf

CAMPOS L. RALPH J. 2005. Universidad Central Venezuela, efecto del tipo de chatarra sobre la colabilidad en aleaciones hipereutecticas Fe-C NODULARES. <<http://saber.ucv.ve>>.pdf

CENKEBICH, I. 1999. "Optimización de la obtención de piezas de Hierro Nodular por el método ind-mould". Liteinoe. Proistbostba. N. 12. pp. 13-14. (en ruso).

CHAIKIN A. A. 1994. Refinado del HGE modificado en el molde por medio De filtros Cerámicos. Liteinoe Proistbosta. N. 4

CHERNOV D. K. 1950 Fundidores: Fundiciones Férrreas y no Férrreas.<<http://www.metalspain.com/Fundidores>>.pdf

CRISTERNA CRUZ H E. 2008. Influencia del Cobre en la producción de Hierro Nodular. Ingenieria Vol. 6. No 41. pdf

DAVIS, K. G. 1990 Dissolution of MgFeSi Alloy During Indmold Treatment. British Foundryman. N. 457.

DELCAM. Base de Datos [en línea], 2004, <<http://www.delcam.com>>

DIJON, R. H. The dissolution factors for the Ind-Mould Process. British Foundryman. N. 8. 1999.

DUNKS, C.M.1976. "Mold Nodulizing and Continuos Stream Treatment Techniques as Operated in Europe". Foundry Trade Journal. N. 234.

ENRÍQUEZ BERCIANO. J .L. 2012. Universidad Politécnica de Madrid. Fabricación de fundición nodular. <<http://oa.upm.es/nodular>>.pdf

ESCOBAR ALEX.2015. On the Effect of Pouring Temperature on Spheroidal Graphite Cast Iron Solidification. : World Wide Science. <<http://scienceresearch.com>>

ESQUEDA A A M. 2000. El tratamiento de los hierros nodulares en el mejoramiento de los materiales en la industria automotriz. Publicación Técnica No 148. ISSN – 0188-7297. <[http://imt.mx/ Publicación técnica/pt148](http://imt.mx/Publicación_técnica/pt148)>.pdf

FRANCOIS, M. 2004. Base de Datos [en línea], El magnesio como desulfurante, <<http://www.cta.org.co/institucional.com>>

FUNDINOX. 2014. ChileSA. Fundición Nodular.<<http://www.fundinox.cl/ASTM A536>>

FUNDICIÓN GRIS NODULAR. 2014. < <http://www.scribd.com/hierro-ductil o nodular>>

FUNDIGUEL S. A B. 2014. IDEMA. Universidad de Azterlan. Proyecto Técnico y estudio de Impacto Ambiental en la nueva planta de Fundición de hierro gris y nodular.

FUNDICIÓN GATTIS.R.L. 2014. Hierro Gris y Nodular. <<http://www.inti.gob.ar/>>.pdf

FUNDICIÓN PERLÍTICA 2014. Nodular.<<http://www.metalservice.net/fund%20gris>>.pdf

FUNDICIONES GRISES. 2014. <<http://www.biblioteca.udep.edu.pe>>.pdf

GIRCHOVIB, N. G. 1982. Método de investigación para determinar la formación del hierro con grafito esferoidal y su valoración. Edit. Masgish.. 45p.

GORSHKOB, A. A.1978. Acerca del formación del grafito esferoidal en las Burbujas Microscópicas durante la cristalización. Edit. Bishaia Scuola. 123 p.

GENDEREVICH N. A. 1999 “Elección del modificador para la obtención de piezas de hierro de alta resistencia modificado en el molde”. Liteinoe roistbostba. N. 2.P 16-17.

GIBBS. 2004. Base de Datos [en línea], 4 de Marzo del 2007, <http://www.gibbs.com>

GOYOS PÉREZ, L.; MARTÍNEZ REINA, ELIO. 1991 “Tecnología de fundición II”. Editorial ISPJAE. Ciudad de la Habana. 243 p.

GORDILLO PINTO S A. 2010. Escuela Politécnica Nacional. Estudio de los tratamientos térmicos de templado y revenido en la fundición de hierro dúctil con matriz metálica ferrítica. < <http://bibdigital.epn.edu.ec>>.pdf

GYNSEY. J. 2001. Co CQ (Controlled Quality Inoculation). Un proceso de alta Productividad. <[http:// www.carpenterfortuna.com.mx/n-hierro.htm](http://www.carpenterfortuna.com.mx/n-hierro.htm)>.Consult.

HIDROSTAL. 2014. Soluciones con Tecnología. Fundición y Mecanizado de Piezas de Fundición Nodular. <<http://www.hidrostal.com>>.pdf

HAYES LEMER H 2014. Empresa de Producción Hierro Nodular. México. <<http://catarina.udlap.mx/capitulo1.pdf>

HIERRO NODULAR. 2014. ASTM 536. < <http://metalnodul.com>>.pdf.

IRON CASTING with Spheroidal or Nodular Graphite Specification. 2002. 3rd reun. <[http:// www.clickafoundry.com / specification](http://www.clickafoundry.com/specification)>. Consultado.

INSTITUTO PARA EL CONOCIMIENTO EN FUNDICIÓN. 2014. Metalurgia de las Fundiciones de Hierro y Conceptos Avanzados de Caracterización. <[http://www.iftabira.org/pdfs/news/Jornada%20Metalurgia\\_1270028729](http://www.iftabira.org/pdfs/news/Jornada%20Metalurgia_1270028729)>.pdf

KARSAY, S. Producción de Hierro Nodular, 2da Edición. Edit. Titanic Inc. Comp.

KOBALOVICH, E. B. 1992. Nueva tecnología de obtención de hierro Nodular. Liteinoe Proistbostba. N. 3. 1999. p. 10.

KRUTHIVENTI, S.; BASAVAKUMAR, K. G.2015. Influence of Heat Treatment on Microstructural and Mechanical Properties of Nodular Cast Iron. Journal of The Institution of Engineers (India): < <http://scienceresearch.com>>

LINCE FUNDICION. 2004. Base de Datos [en línea]<<http://www.lince-fundición.com>>

LUFFE, A. 1994. “Modificación del hierro con grafito esferoidal en el molde”. Liteinoe Proistbostba. N. 12. (en ruso).

MANNION, G. 1994. “Experiences with the production of meehanite Nodular iron casting with the in mold process. Foundry Trade Journal. Vol 137. pp. 139-147. Aug.

MACHIKIN. B. I. 1981. Aumento de la calidad de las aleaciones ferrosas Edit. Kiev.

MALISHEV. A. 1991. Influencia del Silicio sobre las propiedades del HGE. Liteinoe Proistbostba No 9

MAYK. C .N .1998. Sistema de Alimentación para modificación en el molde. Liteinoe Proistbostba No 11.

MANUAL TÉCNICO. 2014. VERSA-BAR .Barras Fundidas Tupy. <<http://www.tupy.com>>.pdf

MOREIRA E. 2011. Metalurgia Del Hierro Nodular. <<http://www.eduardomoreira.com>>.pdf

MCCAULAY. J. M. 1991. "Production of nodular graphite iron Casting In the In-mold Process". Foundry Trade Journal. Vol. 130. pp. 327-335. Apr.

METALLOGRAPHY. Base de Datos [en línea], 2006, 12 de Octubre del 2006, <<http://www.metallography//technoters/iron.com> >. Moscú. 203 p.

NAVAS. E. BATISTA. A. 1996. Métodos de Cálculo en Fundición .Folleto Editado por la Uho.

OLEA O M. 2010. Estudio de la densidad del nódulo en las propiedades mecánicas del hierro dúctil. Instituto Politecnico Nacional. Departamento de ingeniería en Metalurgia y Materiales. <<http://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream>>.pdf

ORDOÑES U. 2005. Modelación por Elementos Finitos como Método para la Sustitución de Piezas de Acero por Hierro Nodular. <http://www.redalyc.org/>.pdf

ProCAST. Base de Datos [en línea], 2007, 12 Febrero del 2007, <<http://www.procast.com>>

PROENGINEER. Base de Datos [en línea], 2004, 2 de Marzo del 2007, <<http://www.procast.com>>

PROYECTO TÉCNICO y estudio de impacto ambiental de la nueva planta de fundición de hierro gris y nodular de fundiguel, S.A. 2014.

<<http://www.euskadi.net>>. pdf

ROLLMAKERS B .2014. GrafitoEsferoidal (SG) Perlítico. <<http://www.brcil.com>>.pdf

RIVERO N D. 2014.Thecnology Aplied to the iron nodular.<<http://www.titania.com>>. .pdf

SÁNCHEZ FIGUEREDO R. P, GARCÍA DOMINGUEZ A. B. PEREZ RODRIGUEZ R. Y RODRIGUEZ GONZALES I. 2015 - article is to show the influence of the vibratory discharge on the resistance of grey iron with spheroidal graphite to traction applying the. 2 sept. revista.ismm.edu.cu/index. /article/ /1147/592

SOLIDWORK. Base de Datos en Línea, 2007, 12 de Febrero del 2007, <<http://www.solid work.com>>

SYSWELD. Base de Datos en Línea, 2004, 4 de abril 2007, <<http://www.syld.com>>

SÁNCHEZ FIGUEREDO R. P. Y C. A. 2007. El Rendimiento Tecnológico General como Regulador del costo de las piezas fundidas de hierro nodular. Resumen III Conferencia Internacional de Ingeniería.

SÁNCHEZ FIGUEREDO R. P Y C. A.2007. El Rendimiento Tecnológico General como Regulador del costo de las piezas fundidas de metales ferrosos y no ferrosos. Convención Internacional de la Industria Metalmeccánica. METANICA. . CD-ISSN 1607-6261.

SÁNCHEZ FIGUEREDO R.P Y C. A.2008. Entorno Tecnológico alternativo para la producción competitiva, sostenible y sustentable de fundidos de cuproaleaciones densos Jornada Científica. Facing. CEDEMA.

SÁNCHEZ FIGUEREDO R. P. Y C. A 2009. Tecnología para la manufactura competitiva de fundidos de aleaciones de Cobre. IV Conferencia Científica. CD – ROOM ISBN- 978-959-16-1010-2.

SÁNCHEZ FIGUEREDO R. P. Y C. A 2009. Cáculo Competitivo del Costo y Precio de los fundidos de bronce y Latones. IV Conferencia Científica. CD – ROOM ISBN- 978-959-16-1010-2.

SÁNCHEZ FIGUEREDO R. P. Y C. A 2011. Impacto Medioambiental con la aplicación de tecnología alternativa de mezcla de moldeo de fundidos de metales ferrosos y no ferrosos. V Conferencia Científica Internacional. UHO.

SÁNCHEZ FIGUEREDO R. P. Y C. A 2012. UPADI 2012. XXXIII. Convención Panamericana de Ingenierías. VI Conferencia Internacional de las Ingenierías Mecánicas, Eléctricas e Industrial. “Tecnología para la obtención de fundidos de cuproaleaciones sanos de poros y sopladuras”. Editorial Obras. CD-ROOM-ISBN 978-959-247-094-1

SÁNCHEZ FIGUEREDO R. P. Y C. A 2012. UPADI 2012. XXXIII. Convención Panamericana de Ingenierías. Congreso medioambiente y desarrollo Humano. MADEHUMAN. “Tecnologías alternativas sostenibles y sustentables en procesos de fundición de metales ferrosos y no ferrosos”. Editorial Obras. CD-ROOM-ISBN 978-959-247-094-1.

SÁNCHEZ FIGUEREDO R. P. Y C. A 2013. VI conferencia Científica Internacional de la Universidad de Holguín. Ingeniería y Desarrollo. “Disminución de nodulizante en la obtención de fundidos de hierro con grafito esferoidal por el método de vertido dinámico”. Editorial Universitaria. ISBN 978-959-16-2138-2.

SÁNCHEZ FIGUEREDO R. P. Y C. A 2013. VI conferencia Científica Internacional de la Universidad de Holguín. Ingeniería y Desarrollo. “Obtención de fundidos metálicos por el método de vertido dinámico”. Editorial Universitaria. ISBN 978-959-16-2138-2.

SÁNCHEZ FIGUEREDO R. P. Y C. A 2002. Perfil Fundición de Acero-Hierro de Holguín. Convención Internacional de la Industria Metalmeccánica METANICA. . CD-ISSN 1607-6261.

SÁNCHEZ FIGUEREDO R. P. Y C. A 2013. VI conferencia Científica Internacional de la Universidad de Holguín. Ingeniería y Desarrollo. “Reducción de las

mazarotas en las piezas de acero por el método de vertido dinámico”. Editorial Universitaria. ISBN 978-959-16-2138-2.

SÁNCHEZ FIGUEREDO R. P. Y C. A 2013. VI conferencia Científica Internacional de la Universidad de Holguín. Ingeniería y Desarrollo. “Influencia en el comportamiento de la estructura metalografica de los fundidos de metales obtenidos por el método de vertido dinámico”. Editorial Universitaria. ISBN 978-959-16-2138-2.

SÁNCHEZ FIGUEREDO R. P. Y C. A 2013. VI conferencia Científica Internacional de la Universidad de Holguín. Ingeniería y Desarrollo. “Recuperación y adaptación de vibrador electromagnético en rampa dinámica, para la obtención de fundidos de metales ferrosos y no ferrosos”. Editorial Universitaria. ISBN 978-959-16-2138-2.

SÁNCHEZ FIGUEREDO R. P. Y C. A 2013. VI conferencia Científica Internacional de la Universidad de Holguín. Ingeniería y Desarrollo. “El comportamiento de la composición química en los fundidos metálicos por el método de vertido dinámico”. Editorial Universitaria. ISBN 978-959-16-2138-2.

SÁNCHEZ FIGUEREDO R. P. Y C. A. 2013. VI conferencia Científica Internacional de la Universidad de Holguín. Ingeniería y Desarrollo. “Cálculo del costo y precio de los fundidos a través del Rendimiento Tecnológico General”. Editorial Universitaria. ISBN 978-959-16-2138-2.

SÁNCHEZ FIGUEREDO R. P. Y C. A. 2013. VI conferencia Científica Internacional de la Universidad de Holguín. Ingeniería y Desarrollo. “Obtención de fundidos de hierro con grafito esferoidal por el método de vertido dinámico”. Editorial Universitaria. ISBN 978-959-16-2138-2.

SÁNCHEZ FIGUEREDO R. P. Y C. A. 2013. VI conferencia Científica Internacional de Aprovechamiento de Recursos Minerales. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Electromec. “Aumento de la competitividad, sostenibilidad y sustentabilidad de los fundidos metálicos por el método de vertido vibratorio” empleados en las KTP y los implementos agrícolas. ISBN del evento es 978-959-16-2244-0

SÁNCHEZ MURCIA S C. 2012. Universidad eafitsolidificación de hierros nodulares.

SUMINDU. 2014. Especificaciones del Hierro Nodular <http://www.sumindu.com>

SAYAGO Q O. 2007. Universidad Simón Bolívar. Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales. Características Microestructurales de una aleación comercial de hierro nodular. p29. pdf

SOLAS MARCILLO ALEXIS ROLANDO. 2013. Caracterización del Grafito de Hierro Fundido nodular Mediante Aplicación ultras <<http://dspace.espoch.edu.ec>>pdf

SPHEROIDAL GRAPHITE CAST IRON.2014. Worldwide Intellectual Property Patents. <<http://scienceresearch.com>>

TARTERA. J. JOINING. 2004. Fabrication of Nodular Iron Casting by welding.

TENORIO I T. 2010. Caracterización microestructural y propiedades mecánicas de una fundición esferoidal con altos contenidos de molibdenoaci: VOL. 1(3), pp. 27-36 2010).

TECNOLOGÍA DE HIERRO NODULAR. 2014. <<http://www.fundelima.com>> 01.pdf

UNIVERSIDAD CATÓLICA ARGENTINA. Fundición. 2008. Nodular.<<http://estudioyensayo>>. fundición -nodular.pdf.

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE ARGENTINA-2014. Metalografía y Tratamientos Térmicos. <<http://www.frro.utn.edu.ar/v2>>.pdf

UMSS 2014. Facultad de Ciencias y Tecnología.Calidad de la fundición. <<http://materia.fcyt.umss.edu.bo/tecno-II/PDF/cap-228>>.pdf

UVA. Fundiciones. 2014. <[https://www5.uva.es/guia\\_docenteDocumento18](https://www5.uva.es/guia_docenteDocumento18)>.pdf

YANG Z R; LI –SHENG D; LAN WANG.2103. Wear Behavior and Mechanism of Spheroidal Graphite Cast Iron. Journal of Iron and Steel Research, International. Base [en línea] 1 de enero 2013. <<http://scienceresearch.com>>