



UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN

OSCAR LUCERO MOYA

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Mecánica

Utilización de las colas de la producción de níquel de la Empresa “René Ramos Latour” como nodulizante en la obtención de hierro con grafito esferoidal

Trabajo presentado en opción al título académico de Máster en Mantenimiento y Reacondicionamiento de Máquinas

RAIZA GONZÁLEZ QUINTANA

Holguín, 2013



UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN

OSCAR LUCERO MOYA

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Mecánica

Utilización de las colas de la producción de níquel de la Empresa “René Ramos Latour” como nodulizante en la obtención de hierro con grafito esferoidal

Trabajo presentado en opción al título académico de Máster en Mantenimiento y
Reacondicionamiento de Máquinas

Autora: Ing. Raiza González Quintana

Tutores: Dr. C. Efraín Navas Medina

Dr. C. Roberto Pérez Rodríguez

Holguín, 2013

RESUMEN

La presente investigación soluciona una de las tareas del banco de problemas de la Empresa de Fundiciones Acero–Hierro de Holguín, dada la necesidad de producir hierro nodular a partir de la utilización de materia prima nacional como nodulizante.

El objetivo general se cumple con la selección de un horno de cubilote para producir el hierro, se realizan los experimentos con cuatro gramajes de cola y se determina la más apropiada. Se exponen los materiales y métodos empleados para las pruebas experimentales. Se plantea la instrucción tecnológica para la industria que permite utilizar la cola de níquel como nodulizante para la producción de hierro nodular de forma eficiente. En la valoración técnico - económica se permite reducir los precios en 11,03 \$/t.

Se demuestra que la mejor nodulización se obtiene con la utilización de la cola resultante de la producción del níquel de la “Empresa René Ramos Latour” (7,55 % Mg, 19,49 % SiO₂ y 0,2 % S) con la cantidad de 300 g y una granulometría de 22,4 mm, vertiéndola en la cazuela por el método “Sandwich” y la inoculación se desarrolla en el sistema de alimentación del molde con FeSi 45 proveniente de la fundición de Holguín y con un tamaño de grano de 1,5 mm, los resultados demuestran lo factible de la utilización de la cola como nodulizante ya que se logra el mayor valor de resistencia a la tracción 512,4 MPa.

Se brindan recomendaciones que permiten mejorar la calidad de la producción en la citada empresa.

ABSTRACT

The following research solves one of the tasks from the problem's bank of the Holguín Steel – Iron Foundry due to the need of producing nodular iron from the use of the raw material as nodulizing.

The general objective is achieved with the solution of a dicebox stove so as to produce the iron we do the experiments with four glue grams and it determined the most appropriate one. The materials are and methods used are showed for the experiments tests. We orient technical instruction for the industries so that it gives you the opportunity to use the nickel as a nodulizing for the production of nodular iron as an efficient way. It is the technical – economic valuation that reduces the prices in 11.03 \$/t.

It is demonstrated that the best nodulizing is abstained with the use of the glue that we get from the production of nickel from the “Rene Ramos Latour” (7.55% de Mg, 19.49% SiO₂, 0.2 % S) with 300g and ore granulometria of 22.4 mm. Ore we pour it casserole by the “Sandwich” method and the inoculation with develop a mold feeding system with FeSi 45 a coming from the Holguín founding and with a 1.5 mm gran. The results show how feasible the use of glue is as nodulizing because we obtain the best value of resistance to the traction 512.4 MPa.

The recommendations let improve the quality of the production in the cited enterprise.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Término	Denominación
MTR	Metales de tierras raras
HGE	Hierro con grafito esferoidal
EFAH	Empresa de Fundición Acero - Hierro de Holguín
MINAZ	Ministerio de la Industria Azucarera
MINTUR	Ministerio del Turismo
MINBAS	Ministerio de la Industria Básica
ERRL	Empresa “René Ramos Latour”
ECPSA	Empresa “Comandante Pedro Soto Alba”
ECECG	Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”
UHO	Universidad de Holguín “Oscar Lucero Moya”

ÍNDICE

Denominación	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	1
Capítulo 1. EVOLUCIÓN HISTÓRICA, CARACTERÍSTICAS Y ESTADO DE DESARROLLO DE LAS ALEACIONES DE HIERRO NODULAR.....	5
1.1 Antecedentes en la evolución del hierro nodular.....	5
1.2 Importancia económica del hierro fundido nodular.....	6
1.3 Elementos fundamentales del hierro nodular.....	7
1.3.1 Aditivos de fusión. Características de los nodulizantes.....	8
1.3.2 Composición química de la aleación nodulizante.....	10
1.3.3 Características de los Inoculantes.....	11
1.3.4 Procedimientos de tratamientos de nodulizantes.....	12
1.3.5 El azufre, sus características tensoactivas y su influencia en la concentración de inclusiones.....	16
1.3.6 Inclusiones.....	19
1.3.7 Carácter desulfurante del magnesio.....	20
1.3.8 Desulfuración.....	21
1.4 Tendencias actuales en la producción de hierro nodular.....	22
1.5 La producción de hierro nodular en Cuba.....	26
1.6 Conclusiones.....	29
Capítulo 2. MATERIALES Y MÉTODOS PARA LA PRODUCCIÓN DE PIEZAS DE HIERRO NODULAR.....	30
2.1 Introducción.....	30
2.2 Producción de hierro en el horno de cubilote de la EFAH de Holguín.....	30
2.2.1 Procedimiento de fusión en horno de cubilote de la EFAH de Holguín.....	31
2.3 Método utilizado para la nodulización en cazuela por el método “Sandwich”.....	36
2.3.1 Vertido del metal en el molde con el inoculante en el sistema de alimentación.....	36
2.4 Análisis granulométrico de la cola de níquel de la ERRL.....	39
2.5 Diseño del experimento y equipamiento para la determinación de la composición química del hierro obtenido.....	40
2.6 Características técnicas de la máquina universal de prueba a tracción, compresión y flexión DNS – 200.....	42
2.6.1 Preparación por maquinado de las probetas.....	42
2.7 Equipamiento para los ensayos metalográficos.....	43
2.7.1 Métodos para determinar el tamaño de grano.....	46
2.7.2 Equipo utilizado en la investigación para la micro-estructura.....	47
2.8 Conclusiones.....	48
Capítulo 3. UTILIZACIÓN DE RESIDUALES DE LA INDUSTRIA DEL NÍQUEL COMO NODULIZANTE.....	50
3.1 Introducción.....	50

<i>3.2 Análisis de la composición química de los residuales de la Industria del níquel.</i>	50
3.2.1 Selección de la cola.....	51
<i>3.3 Desarrollo del experimento para determinar la eficiencia de la cola ERRL.....</i>	51
3.3.1 Obtención de probetas en el molde.....	52
3.3.2 Procedimiento para el vertido.....	53
<i>3.4 Presentación de resultados.....</i>	53
<i>3.5 Instrucción tecnológica para utilizar la cola de níquel de la ERRL como nodulizante en la producción de piezas de hierro nodular.....</i>	56
<i>3.6 Valoración técnico – económica.....</i>	56
<i>3.7 Conclusiones.....</i>	57
CONCLUSIONES GENERALES.....	59
RECOMENDACIONES.....	60
BIBLIOGRAFÍA.....	61

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la construcción de maquinarias juega un papel preponderante en el progreso de un país. La producción de artículos metálicos de las aleaciones ferrosas es la base fundamental en la industria de la construcción, automovilística, naval, azucarera, entre otras, así como en la fabricación de piezas para maquinarias agrícolas.

Dentro de las aleaciones ferrosas, una de las más difundidas tanto por su uso como por su factibilidad económica, lo constituyen las llamadas fundiciones, estas no son más que aleaciones de hierro - carbono con un porcentaje de carbono mayor de 2.13 %, además, de otros elementos que son 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 aleadas, por su estructura en fundiciones grises con grafito laminar, vermicular, maleable y esferoidal.

Es conocido que el hierro con grafito esferoidal puede superar al acero en cuanto a sus propiedades de fundición, menor densidad y costo por tonelada. Por esos motivos es una tendencia mundial la sustitución de piezas de hierro fundido y acero, por hierro con grafito esferoidal. Esta transformación se puede observar fundamentalmente en la industria automovilística, naval, en la construcción de maquinarias agrícolas, etc. Nuestro país no se ha quedado atrás en esa tendencia mundial y para lograr exitosamente esta línea de trabajo son múltiples los problemas a resolver.

La Empresa de Fundición de Acero - Hierro de Holguín (EFAH) [Sánchez, 2002] presenta dos talleres fundamentales: hierro y no ferroso. Esta empresa es una de las entidades que presenta en su banco de problemas la producción de nodulizantes para obtener hierro nodular. El taller de producciones ferrosas cuenta con un horno de cuba alta discontinuo de 720 mm de diámetro interior. La capacidad calculada del mencionado taller es de 360 toneladas al año. Se producen piezas principalmente para la Industria Mecánica, el MINAZ, el MINTUR, el MINBAS, entre otras.

En la actualidad, la carga para la producción del hierro fundido gris presenta la siguiente composición: 70 % de chatarra de hierro y 30 % de retorno. La producción del hierro con el grafito nodular se comienza a usar alrededor de los años de la década de 1950, a partir de ese momento comienza el uso generalizado del mismo en la industria de la fundición hasta

el punto en que ha desplazado al acero en muchos usos y al hierro maleable y al hierro gris.

Para la obtención del hierro nodular se necesita el nodulizante, dentro de los cuales podemos encontrar varios como son el magnesio, el cerio y los metales de las tierras raras. Sin embargo, el más empleado es el magnesio en forma de aleación. Los nodulizantes entran en la gama de materias primas y materiales siderúrgicos bloqueados, por lo que aparecen en el mercado con altos precios, comercializados en Cuba por la Empresa ACINOX Comercial.

Los nodulizantes como se ha dicho, se utilizan para producir hierro nodular y este es empleado en la fábrica de cosechadoras de caña “60 Aniversario de la Revolución de Octubre” y la empresa “Héroes del 26 de Julio”, principalmente en piezas que se utilizan para la modernización del armamento cubano e implementos agrícolas. Estas particularidades de nuestra industria han provocado el surgimiento de un **problema científico**: la no existencia de un procedimiento científicamente fundamentado para la utilización de las colas provenientes de la producción de níquel, como nodulizante en la obtención de hierro con grafito esferoidal bajo las condiciones actuales en la industria sidero-mecánica cubana.

El **objeto de estudio** de la presente investigación son los nodulizantes y las materias primas que intervienen en la obtención del hierro nodular. Como **campo de acción** se definió la utilización de las colas de níquel de la “Empresa René Ramos Latour” (ERRL) como nodulizante para la obtención de aleaciones de hierro con grafito esferoidal.

Se esboza como **necesidad**, elaborar el procedimiento que asegure la obtención de hierro con grafito esferoidal a partir de las colas de níquel de la ERRL de una forma eficiente y aplicable a las condiciones actuales de la industria en Cuba.

Como **hipótesis** se plantea que controlando los parámetros del método “Sandwich”, las colas de níquel de la ERRL como nodulizante y su granulometría, además del contenido de azufre en la aleación base, es posible la implementación de la producción de hierro con grafito esferoidal adaptándolo a las condiciones actuales de la industria cubana.

De esta forma se define como **objetivo general** demostrar que es posible en las condiciones actuales de la industria sidero-mecánica cubana, la obtención de aleaciones

de hierro con grafito esferoidal, utilizando las colas de la producción de níquel de la ERRL como nodulizante.

Como **aporte** de la investigación se define que la alternativa de utilizar como nodulizante la cola de níquel de la ERRL en la producción de hierro con grafito esferoidal, bajo las condiciones específicas de la industria metalúrgica cubana.

Como **objetivos específicos** se definieron:

1. Evaluar los procedimientos existentes para la obtención de hierro con grafito esferoidal y su estado actual de aplicación en las industrias involucradas con el proceso en el mundo y el país.
2. Asegurar la implementación de las colas de níquel como nodulizante en la obtención de hierro con grafito esferoidal, de forma tal que presente facilidades para su adecuación a las condiciones de Cuba sobre la base de la síntesis del estudio realizado.
3. Elaboración de un esquema que garantice la correcta organización del procedimiento para la obtención de hierro con grafito esferoidal.

Se definieron las siguientes **tareas** para el cumplimiento de los objetivos:

1. Revisión bibliográfica, análisis de la documentación tecnológica de la “Empresa de Fundición Acero – Hierro de Holguín” (EFAH) y consulta con expertos.
2. Realizar un estudio de la composición química del hierro fundido producido en la EFAH con el fin de determinar la factibilidad de producir hierro con grafito esferoidal.
3. Seleccionar a partir del estudio realizado cuál es la cola de níquel que cumple con las características necesarias para fungir como nodulizante.
4. Determinar el método de nodulización e inoculación a utilizar en la obtención del hierro con grafito esferoidal.
5. A partir de la cola seleccionada como nodulizante, determinar la granulometría adecuada de la misma.
6. Elaboración del informe final.

Beneficios esperados:

Establecer las colas de níquel de la ERRL como nodulizante, adecuado a las condiciones actuales de la industria en Cuba para la obtención de hierro con grafito esferoidal.

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 qué se ha investigado sobre las tecnologías que permita la obtención de nodulizante.

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 la utilización de la cola de níquel de la ERRL como nodulizante.

Enfoque sistémico: durante la concepción del procedimiento y al definir la estructura que garantiza la organización del proceso.

Método de análisis y síntesis: se utiliza para identificar los factores principales y las características que influyen en el fenómeno que se estudia, así como su interrelación. Se aplica para identificar las etapas que intervienen en la utilización de la cola de níquel de la ERRL en la obtención del hierro nodular.

La tesis consta de una introducción, tres capítulos, conclusiones, recomendaciones y bibliografía.

Capítulo 1. EVOLUCIÓN HISTÓRICA, CARACTERÍSTICAS Y ESTADO DE DESARROLLO DE LAS ALEACIONES DE HIERRO NODULAR

1.1 Antecedentes en la evolución del hierro nodular

En el congreso de la A.F.S. (American Foundrymen's Society), Morrogh y W. J. Williams en mayo de 1948 dieron a conocer que determinados elementos del grupo de las materias alcalinas, al igual que el cerio ejercían una influencia específica sobre la formación del grafito esferoidal. Tratando la fundición líquida con *mischmetal* cerio, estaban en condiciones de producir fundición con grafito esferoidal. En el debate que siguió, T. H. Wicken, de la *International Nickel Corporation* (INCO), anunció, ante el asombro general de las personas allí presentes, que su compañía realizaba investigaciones de laboratorio en este campo desde hacía muchos años y que habían ideado un procedimiento para elaborar fundición con grafito esferoidal agregando cantidades muy pequeñas de magnesio al caldo de la fundición gris.

Este descubrimiento fue patentado por la *International Nickel Corporation* en 1949 y constituyó la base para la producción industrial de la fundición con grafito esferoidal debido a que el magnesio ha resultado ser un elemento especialmente eficaz para la formación de grafito esferoidal, para la producción de fundición con dicho tipo de grafito y debido también a que puede obtenerse en cantidades suficientes, lo mismo ocurre con el cerio. La patente derivada del descubrimiento de T. H. Wicken adquirió gran importancia en la práctica.

Los campos de aplicación de la fundición con grafito esferoidal cubren en la actualidad grandes sectores que antes estaban reservados al acero fundido, a la fundición maleable, a las piezas forjadas e incluso a la fundición gris.

La industria del automóvil reconoció muy pronto las ventajas económicas de este material. Su éxito y consolidación surgió de su empleo en la fabricación de cigüeñales, a comienzo de los años 60 por la *Ford Company* USA. EL empleo de este material en cigüeñales demostró que el mismo tiene una buena tenacidad y resistencia a la fatiga. Esto significa que en muchos casos las propiedades mecánicas son mejores y más elevadas que las del acero.

Cada una de las diferentes clases de fundición tiene sus propias características. El acero es resistente; la fundición maleable, tenaz; la fundición blanca, dura; la fundición gris, frágil

y económica; la fundición con grafito esferoidal reúne casi todas estas propiedades y ha sido probada en los productos en los que la dureza y también el rendimiento económico desempeña un papel importante [Abramov, 1983; Genderevich, 1999]. Las propiedades mecánicas son esencialmente los datos que interesan especialmente a los usuarios y que, en primer lugar, permiten y controlan la producción de un material determinado.

1.2 Importancia económica del hierro fundido nodular

Este material posee excelentes propiedades mecánicas y posee buena fluidez en estado líquido. Un número cada vez mayor de elementos de construcción sometidos a esfuerzos se fabrican de fundición con grafito esferoidal. Sustituyen a las piezas de fundición gris que, a causa de sus reducidas propiedades mecánicas, resultan pesadas y toscas. Para las piezas complicadas, sustituye también al acero moldeado y a las piezas forjadas, cuya elaboración ya no resulta económica.

El considerable aumento de la producción mundial esperado para el futuro se debe ante todo a la sustitución, por la fundición con grafito esferoidal de las fundiciones gris y maleable y del acero moldeado, así como de las piezas forjadas y soldadas. El aumento del consumo de la fundición con grafito esferoidal en la industria automovilística y de la construcción de maquinarias sobre todo en Europa, lo mismo que la sustitución de las lingoteras de fundición gris por piezas de fundición con grafito esferoidal, pueden ser decisivos para esta evolución.

Se aprecia la evolución de la producción de hierro con grafito esferoidal en Europa occidental, Estados Unidos, Japón, así como los países del antiguo Consejo de Ayuda Mutua Económica (CAME) y en otros países desde el año 1970, hasta 1999. La producción mundial de fundición con grafito esferoidal para el período comprendido entre 1979 y 1993 logró un porcentaje de crecimiento entre el 5 y el 10 %, en el periodo de 1995 al 1999 su producción aumentó en un 19 %, hasta el año 2005 la producción fue cercana a los 63,8 millones de toneladas anuales.

El acero fundido, las fundiciones maleables y con grafito esferoidal exigen cantidades de energía parecidas, hasta el momento de su colada en el molde, pero los dos primeros solo logran sus propiedades mecánicas tras el tratamiento térmico, el cual exige una energía adicional. La fundición con grafito esferoidal puede elaborarse, en gran parte, sin

tratamiento térmico, es decir, puede utilizarse en estado bruto de colada y sus propiedades de resistencia y de ductilidad son comparables a la del acero moldeado.

Este es el motivo de que sea probable que la fundición con grafito esferoidal en estado bruto de colado reemplace cada vez más al acero moldeado (y en algunos casos a las piezas forjadas de acero), a la fundición maleable y también a la fundición de hierro gris. De ese modo, los métodos de tratamiento con magnesio aumentan en importancia, dado que economizan energía y garantizan altos rendimientos de magnesio y bajas pérdidas de temperatura.

Puede admitirse que del 10 al 20 % de los 55 millones de toneladas a que asciende la producción mundial con grafito esferoidal corresponde a piezas coladas que solo requieren un peso sin ninguna pretensión en lo que se refiere a propiedades mecánicas. Por el contrario, del 80 al 90 % de la producción mundial de la fundición gris, es decir, alrededor de 45 millones de toneladas, corresponde a piezas que exigen propiedades mecánicas y que están sometidos a esfuerzos, por lo menos a una de sus partes. Si estas piezas se construyeran para ser coladas en fundición con grafito esferoidal podría lograrse una reducción del peso, según las experiencias, comprendida entre el 20 y el 40 %, en promedio el 30 %. Esto produciría una economía anual de aproximadamente 14 millones de toneladas de fundición y daría por resultado, junto a una economía de energía de aproximadamente 70 millones de kW por año, un ahorro considerable de materias primas, las que también están disminuyendo considerablemente.

1.3 Elementos fundamentales del hierro nodular

La fundición nodular, dúctil o esferoidal se produce en hornos de cubilotes, con la fusión de arrabio y chatarra mezclados con coque y piedra caliza. La mayor parte del contenido de carbono en el hierro nodular, tiene forma de esferoides. Para producir la estructura nodular el hierro fundido que sale del horno se inocula con una pequeña cantidad de materiales como magnesio, cerio, o ambos. Esta microestructura produce propiedades deseables como alta ductilidad, resistencia, buen maquinado, buena fluidez para la colada, buena endurecibilidad y tenacidad. Este tipo de fundición se caracteriza porque en ella el grafito aparece en forma de esferas minúsculas y así la continuidad de la matriz se interrumpe mucho menos que cuando se encuentra en forma laminar, esto da

lugar a una resistencia a la tracción, tenacidad mayores que en la fundición gris ordinaria. La fundición nodular se diferencia de la fundición maleable en que normalmente se obtiene directamente en bruto de colada sin necesidad de tratamiento térmico posterior [Luffe, 1994].

La fundición gris es la base para la fundición nodular donde la mayoría de las fundiciones grises son aleaciones hipo-eutécticas que contienen entre 2,5 y 4 % de carbono. El proceso de grafitización se realiza con mayor facilidad si el contenido de carbono es elevado, las temperaturas elevadas y si la cantidad de elementos grafitizantes presentes, especialmente el silicio, es la adecuada. Estas son las más utilizadas en la industria metalúrgica para la producción de piezas que requieran operaciones de mecanizado finales, esto es debido a que son muy mecanizables en todo tipo de máquinas herramienta excepto en el proceso de rectificado.

1.3.1 Aditivos de fusión. Características de los nodulizantes

Los nodulizantes (Figura 1.1) son aleaciones que contienen silicio y elementos como magnesio, cerio o calcio y que promueven la transformación del grafito laminar en nodular o vermicular mejorando la resistencia mecánica, el alargamiento y la resistencia del material. Los nodulizantes son desarrollados en las empresas de fundición de acuerdo a los minerales que posean, con características similares en su composición [Ilarduya, 2012].



Figura 1.1. Nodulizantes.

ILARDUYA dispone de una amplia gama de nodulizantes con diferentes granulometrías y diferentes contenidos en magnesio, calcio y metales tierras raras. Actualmente también ofrece la posibilidad de la nodulización mediante hilo "Cored Wire", lo cual permite una

1.3.2 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 han encontrado 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 [Batista^c, 2003].

Por su parte, si la relación Si/Mg es menor que 5, 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 [Sánchez^a, 2007; Sánchez^b, 2007; Sánchez^c, 2007; Sánchez^d, 2007; Sánchez^e, 2007].

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.

Cantidad de aleación nodulizante

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.

Porcentaje de magnesio residual deseado

Según Alexander [Alexandor, 1998], trabajos investigativos señalan que debe quedar por lo menos 0.040 % de magnesio residual para conseguir que todo el grafito sea nodular (otros autores delimitan un intervalo entre 0.035 y 0.05 %) y para obtener a la vez, la mejor, combinación de características mecánicas [Tartera, 2012; Sánchez^a, 2007; Sánchez, 2008; Sánchez^a, 2009; Sánchez^b, 2009; Sánchez, 2010].

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

Según Lince [Lince, 2013], cuando el contenido de magnesio residual en la fundición es excesivo, lo cual no es recomendable, en la microestructura pueden aparecer racimos de hojuelas de grafito nodular y flotación de nódulos, así como existe 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 [Sánchez^a, 2007].

1.3.3 Características de los Inoculantes

La inoculación (Figura 1.2) permite controlar la estructura y las propiedades de la fundición de hierro mediante el aumento de núcleos de cristalización que favorecen la formación de grafito laminar en el caso de la fundición gris o grafito esferoidal en el caso de la fundición nodular.



Figura 1.2. Inoculantes.

La inoculación elimina la tendencia al blanqueo y aumenta características como la resistencia mecánica y la maquinabilidad. En el caso de la fundición nodular incrementa también el número de nódulos y crea una estructura más fina y homogénea en todo el rango de secciones [Ilarduya, 2012].

ILARDUYA, asesora al fundidor en la elección del inoculante más apropiado. La elección dependerá de condiciones como el contenido inicial de azufre en el hierro (fundición gris), la temperatura, el tiempo de desvanecimiento y el método de adición. La amplia gama de inoculantes disponibles están basados en aleaciones de ferro-silicio que contienen elementos como por ejemplo el calcio, bario, circonio, aluminio y estroncio.

Tipos de inoculantes: (a) **FERROSILICIO** (75% Std. Granular, 75% Std. Piedra, Alta Pureza, Fino); (b) **METÁLICOS** (IM 75B: Ba, Ca; IM 22: Ba, Ca, Mn, Zr; IM 63: Ba, Ca, Mn; IM 43: Zr, Ca; IM TI: Ti, Ca; IM SR: Sr, Ca; IM CE: Ce, Ca; FeSiZr: Zr, Si; CaSi: Si, Ca, etc.; FeSiCaBe Al, Ca).

1.3.4 Procedimientos de tratamientos de nodulizantes

Según Saavedra y Vilorio [Saavedra^a, 2013; Saavedra^b, 2013] los elementos nodulizantes son el magnesio y en menor proporción el calcio. El magnesio es el más utilizado, tiene un punto de fusión es de 650°C, mientras que el metal fundido se vierte a 1350 °C aproximadamente y una presión de vapor de 10 atmósferas por lo que la adición de Mg es explosiva cuando se agrega solo este elemento, generalmente va acompañado de elementos pesados tales como el silicio, el hierro, el cobre o el níquel, reduciendo la presión de vapor considerablemente, dentro de las aleaciones más utilizadas se encuentran las expresadas en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2. Aleaciones nodulizantes.

Aleaciones	%Magnesio	%Silicio	%Níquel	%Calcio	% Hierro
TIPO 1	15		85		
TIPO 2	5	15		2	RESTO
TIPO 3	10	45		2	RESTO
TIPO 4	15	30	55		
TIPO 5	10	65		6	RESTO
TIPO 6	15	50		4	RESTO
TIPO 7	18	65		2	RESTO
TIPO 8	30	60		4	RESTO

El Mg es el responsable de la nodulización del grafito en los hierros hipo e hipereutéticos, es un poderoso desulfurante y desoxidante. Si el contenido de O₂ y/o de S en el baño es muy alto, una cantidad apreciable de Mg se consumirá en la formación de óxidos y

sulfuros de Mg. Las teorías hasta el momento estudiadas dan por hecho que el Mg es el centro de nucleación y es el que produce la forma nodular.

Una de las teorías más aceptadas plantea que existe una caída en el potencial de ionización de átomos de Mg, acompañado de la alta afinidad que existe en este estado entre el Mg y el C, además de la alta temperatura del baño, conduce a una interacción donador - receptor entre átomos de C y Mg formando el complejo $Mg + \cdot C \cdot$. El Mg servirá como núcleo o punto de partida para que el grafito se reúna a su alrededor, de esta manera la célula crece y forma un nódulo, esto explica en cierta forma la alta concentración en el centro de estos nódulos.

La cantidad de Mg a adicionar en el baño debe ser bien dosificada para evitar formas indeseadas de grafito y variaciones imprevistas en la matriz, pues se sabe que el Mg residual actúa como un estabilizador de carburos, promoviendo la formación de carburos primarios en piezas de sección delgada o restringiendo la formación de estructura ferrítica en piezas de sección gruesa. Además, los contenidos excesivos de magnesio residual tienden a formar espumas y escorias con la consecuencia de poros en las piezas fundidas, el contenido de magnesio residual oscila entre 0.05 y 0.08 %, aunque existen otras teorías que afirman que la cantidad óptima está entre 0.03 y 0.06 %.

Hay que tener en cuenta, además, que el rendimiento del magnesio no es del 100 %, este depende de la temperatura del baño, del proceso empleado y de la concentración del magnesio en la aleación. En la tabla 1.3 se relaciona como varía el rendimiento para diferentes porcentajes de Mg.

Tabla 1.3. Rendimiento a diferentes porcentajes de Mg.

% de Mg en aleación	Rendimiento
Mg puro	0
50	10 - 25
8 - 12	20 - 40
4 - 8	40 - 60

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, la cantidad de Mg total a adicionar se puede determinar por medio de la fórmula (1.1).

$$Mg = \frac{Mg_{RES} + 3/4(S_1 + S_2)}{\eta} \quad (1.1)$$

Donde: S_1 : azufre antes del tratamiento; S_2 : azufre después del tratamiento; η : rendimiento de la incorporación del magnesio.

Hay que tener en cuenta también que la proporción de magnesio residual decae con el tiempo en la fundición líquida, debido principalmente a la afinidad del Mg con el S. De modo que una pieza que deba colarse 10 minutos después del tratamiento debe contener más Mg residual que una que ha de colarse inmediatamente después del tratamiento.

Otro aspecto que hay que tener muy presente es el punto de fusión del Mg, que es de 650 °C aproximadamente, en la zona de temperatura de fusión de la fundición de hierro, donde el Mg desarrolla una presión de vapor alta y peligrosa desde el punto vista operativo y que por lo tanto hay que controlar.

El Mg se pone en contacto con el hierro de acuerdo al proceso que se ha de desarrollar, pero la cantidad en que este elemento se adiciona influye en la forma del grafito de la siguiente manera: si la cantidad de Mg es insuficiente se promueve la formación de grafito laminar o interdendrítico, con presencia de algunos nódulos en forma esporádica, al aumentar el porcentaje de magnesio residual se aumenta de igual forma la producción de nódulos y aparecen a veces formas muy variadas de grafito, tales como rosetas, láminas, etc. Cuando el magnesio residual se encuentra en cantidades muy altas por encima de 0.18 % ocasiona la aparición de grafito en forma de espiga, diseminado entre los nódulos deformados. Cuando el magnesio residual se encuentra en la proporción adecuada se presenta solo grafito en forma nodular y la presencia de otras formas de grafito es casi nula.

Los procedimientos para la fabricación de la fundición nodular son numerosos pero en general pueden ser clasificados en tres grupos, según la naturaleza de las fundiciones tratadas.

(a) Procedimiento de la fundición con tratamiento de magnesio puro

Como se ha mencionado anteriormente, la adición de magnesio puro a la fundición líquida es muy peligrosa y requiere de técnicas especiales, debido a la evaporación explosiva del magnesio a temperatura normal de fundición. Este fenómeno disminuye el rendimiento del magnesio como nodulizante. Para aumentarlo se recomienda adicionarlo bajo presión

gaseosa elevada, logrando que la temperatura de ebullición del magnesio ascienda más que la temperatura de la fundición líquida.

Este procedimiento se utiliza en la cámara de presión y en la cuchara de presión, en la primera se procede en este orden, se cierra, se introduce en el recipiente gas a alta presión. Seguidamente se introduce el magnesio en la fundición. En la cuchara, la elevada presión se consigue por la evaporación del magnesio, por este motivo, la cuchara adopta una forma especial, y el espacio libre de la parte superior del baño es relativamente pequeño.

(b) Procedimiento de tratamiento de la fundición con aleaciones de escasa densidad

Se trata de aleaciones de silicio o ferro - silicio con 5 - 35 % de magnesio, que son mucho más económicas que las del tipo níquel - magnesio pero con menor peso específico. El procedimiento a seguir es el siguiente, se depositan en el fondo de la cuchara sobrenadando fácilmente en la fundición cuando se llena aquella, para prevenir una reacción en superficie insuficiente y variable, para obtener un resultado eficiente con estas aleaciones es necesario emplear técnicas apropiadas.

Otra técnica consiste en la inmersión de la aleación contenida en una campana de material refractario o de grafito. La campana está unida a una pesada capa que cubre la cuchara durante el tratamiento, para impedir las proyecciones de metal resultante de la reacción violenta; que para aleaciones con 5 - 10 % de magnesio resulta un poco violenta por lo que se puede depositar en el fondo de la cuchara. Actualmente se utilizan tres métodos diferentes.

El primero consiste en depositar la aleación en el fondo y en un lado de la cuchara y cubrirla con desperdicios de chapa de acero, que va siendo cubierta con la fundición a medida que se llena la cuchara por el lado opuesto. Otro método es el denominado Sandwich, la aleación se deposita en una cavidad en el fondo de la cuchara y se tapa con chapas de acero. Al ser llenada la cuchara por la parte superior del fondo se va cubriendo la aleación con fundición líquida. En un nuevo método denominado "Triggerr method" la aleación se deposita en una cavidad en el fondo de la cuchara se cubre con una capa de carburo de calcio de granulometría 0.3 - 0.7 mm. Al contacto de la fundición líquida el carburo se vitrifica y forma una corteza sólida una vez llenada la cuchara, la corteza es perforada por un vástago de acero iniciándose así, una reacción moderada.

(c) Procedimiento de la fundición con aleaciones pesadas

Las aleaciones pesadas en base de níquel o de cobre presentan la ventaja de un empleo más sencillo que las aleaciones de baja densidad. Estas aleaciones pueden depositarse en el fondo de la cuchara sin precauciones especiales o incluso verterse en la cuchara después de llenada esta. Estas aleaciones son empleadas en las fundiciones inglesas productoras de fundición nodular que utilizan aleación Ni - Mg.

1.3.5 El azufre, sus características tensoactivas y su influencia en la concentración de inclusiones

Para lograr con eficacia la tecnología de obtención del hierro con grafito esferoidal, es imprescindible lograr el control del azufre. Este último posee gran afinidad química con el magnesio, lo cual se representa con la ecuación (1.2) [Navas, 2000].

$$\Delta G^0_{MgS} = -174928 + 18.29T \text{ (J/mol)} \quad (1.2)$$

Esta gran afinidad provoca que al iniciarse el contacto nodulizante - metal, el azufre reacciona con el magnesio del nodulizante y le resta el efecto globulizador al mismo. Es por eso, que el mismo es considerado el principal elemento desmodificador dentro de las impurezas presentes en las aleaciones de hierro fundido.

En investigaciones realizadas por varios autores [Navas, 2000], se comprobó que en aleaciones de hierro con grafito esferoidal, con ciento por ciento de nodulización, a medida que aumenta el contenido de azufre en la composición química el metal base presenta una pequeña disminución de las propiedades mecánicas en comparación con aleaciones de menor contenido de azufre en el metal base.

En otras investigaciones realizadas también se llegó a la conclusión de que neutralizado todo el azufre que podía reaccionar con el magnesio y obteniéndose una esferoidización completa en todo el volumen de la pieza, a medida que era superior el contenido de azufre remanente también se notaba la mencionada disminución de las propiedades mecánicas. Partiendo de estas conclusiones fue posible deducir que el contenido de azufre en las aleaciones ya esferoidizadas ejercían cierta influencia en las propiedades mecánicas del metal en estado bruto de colada. A partir de estas investigaciones se analizaron las posibles causas de la disminución de las propiedades mecánicas.

El azufre remanente, después de nodulizada la aleación, provoca la presencia de sulfuros en los límites intergranulares de la aleación, lo que trae consigo la disminución de las propiedades mecánicas. Esta hipótesis fue demostrada en el año 1997 basándose en investigaciones previas realizadas en el año 1992 y se comprobó que eran directamente proporcional el contenido de azufre remanente y la cantidad de sulfuros en la microestructura, pero a muy pequeñas diferencias del contenido de azufre se observa una pequeña pero marcada influencia en las propiedades mecánicas.

El problema consiste en demostrar el mecanismo mediante el cual se pueda comprobar la posible interrelación entre el contenido de azufre en la aleación ya esferoidizadas y los valores de resistencia a la tracción.

En estudios realizados se pudo comprobar que los fenómenos de tensoactividad podían ejercer cierta influencia en las propiedades mecánicas de las aleaciones de hierro con grafito esferoidal [Navas, 2000].

Kudrin plantea que al examinar las propiedades del metal líquido es necesario tener en cuenta que las partículas que se encuentran en las capas interiores y exteriores del líquido experimentan diversas influencias de las partículas que los rodean, por esa razón, las propiedades de las capas superficiales de una sustancia siempre divergen algo de las interiores [Navas, 2000].

Con el aumento de la superficie, el potencial isobárico de las sustancias se incrementa, a consecuencia de lo cual, la capacidad de la sustancia de desprenderse de la fase dada en cualquier proceso aumenta, por lo tanto crece la solubilidad, la actividad química, etc. Esta circunstancia ha de tomarse en consideración puesto que en la fabricación del hierro fundido nodular durante la modificación con el nodulizante la mayor parte de los procesos ocurren en la separación de las fases grafito - burbuja de vapor de magnesio, oxígeno - inclusiones, azufre - inclusiones, metal - vapor de magnesio, etc. [Navas, 2000].

Así la superficie de separación modificador - metal, es mucho mayor durante el momento de la ebullición del magnesio que en estado tranquilo del baño y por lo tanto los fenómenos superficiales durante el proceso de obtención del hierro con grafito esferoidal se manifiestan con más intensidad que los fenómenos superficiales durante el proceso de obtención de aleaciones de hierro gris común [Navas, 2000].

El exceso de esa energía en la capa superficial de la sustancia cerca de la superficie de contacto de los cuerpos en comparación con la energía de la sustancia en el interior del cuerpo es lo que se denomina energía superficial y es igual al trabajo consumido para la formación de la superficie, o sea, el trabajo necesario para vencer las fuerzas intermoleculares o interatómicas de cohesión al desplazarse las moléculas los átomos desde el seno de la fase hacia la capa superficial.

La energía superficial libre específica para los líquidos móviles es igual a la tensión superficial. Esta última es una de las más importantes características termodinámicas de la superficie de separación de las fases que se define como el trabajo que debe gastarse para formar la unidad de área de la superficie. Se expresa en J/m^2 (la energía por la unidad de superficie) [Navas, 2000].

Se conoce que, los procesos relacionados con la disminución del potencial termodinámico ocurren de forma espontánea, por tanto los procesos vinculados con la reducción de la tensión superficial se realizarán espontáneamente.

Al estudiar los procesos de la obtención de hierro con grafito esferoidal, y precisamente en el momento de la adición del nodulizante, se observa, que se trata de reacciones de disolución donde las fuerzas de interacción entre los diferentes componentes no son iguales [Davis K. G. 1990].

Teniendo en cuenta la espontaneidad del transcurso de los procesos debido a que la energía libre del sistema disminuye en este caso los procesos están relacionados con la disminución de la tensión superficial, en la capa superficial se incrementará la concentración de aquel componente cuyo aumento causa la disminución de la tensión superficial.

El fenómeno de la variación de contenido del componente dado en la capa superficial en comparación con su contenido en las capas internas, se llama absorción, las sustancias que hacen disminuir la tensión superficial del disolvente, o sea, las sustancias cuya concentración es mayor en la capa superficial que en la disolución se denominan tensoactivas. Toda sustancia, siendo componente de una disolución líquida de un gas o vapor, en condiciones correspondientes, puede manifestar la actividad superficial, es decir, disolverse bajo la acción de las fuerzas intermoleculares en una u otra superficie, reduciendo su energía libre. No obstante, tensoactivas se acostumbra llamar solo aquellas

sustancias cuya absorción con una concentración muy pequeña décimas o centésimas de por ciento ocasiona la disminución brusca de la tensión superficial [Navas, 2000].

Las investigaciones han mostrado que tales elementos como el oxígeno, el azufre, el boro, el cerio, el calcio y otros son tensoactivas con respecto al hierro.

Las pequeñas adiciones de elementos tensoactivos hacen disminuir la tensión superficial del hierro en un 20...30 %, con lo que el contenido de estos elementos en la capa superficial aumenta. La diferencia entre las concentraciones en volumen y superficiales de las sustancias tensoactivas puede ser bastante notable. Así por ejemplo, si la concentración de azufre en el metal es de 0,005 %, su concentración en la superficie constituye varias unidades de por ciento de su concentración [Navas, 2000].

Está demostrado que mientras menor sea la tensión superficial menor trabajo se requiere para que se forme un germen y serán más favorable las condiciones para la formación de una nueva fase. Por consiguiente, la presencia de impurezas tensoactivas en el metal crea las condiciones para la separación de la nueva fase (burbujas de gas, inclusiones no metálicas etc.) [Navas, 2000].

1.3.6 Inclusiones

Se denominan inclusiones no metálicas, a los componentes de Fe, Mn, Cr, W, V, Ti que reaccionan con los no metales formando nitruros, sulfuros, óxidos, etc. Además todos aquellos elementos que aparecen en la estructura de la aleación sin formar parte de la misma.

Las inclusiones no metálicas ejercen una influencia negativa en las propiedades de la aleación, pues una alta concentración de estas reduce el límite de fatiga de las aleaciones, provocan debilitamiento de los enlaces íntergranulares y si tienen forma aguda, son fuentes de concentración de tensiones.

El proceso de formación de las inclusiones, como resultado de las reacciones entre los componente disueltos en el metal, así como, el desprendimiento de las inclusiones, disminución de la solubilidad en el hierro, están relacionados con los procesos de formación de una nueva fase a partir de la fase inicial al bajar la temperatura durante la cristalización.

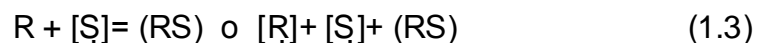
Sobre el mecanismo de formación de una nueva fase influyen factores termodinámicos: probabilidad de principio de transcurso del proceso, así como la intensidad y la velocidad con que transcurre la formación de la nueva fase, que son los factores cinéticos. Del estudio de estos procesos ha quedado claro lo siguiente: la intensidad de la formación de los gérmenes de una nueva fase (inclusión) será mayor cuanto menor sea el valor de la tensión superficial $\delta_{me-incl}$ en el límite metal-inclusión y cuanto mayor sea el grado de saturación [Navas, 2000].

El proceso de desprendimiento de las inclusiones, se facilita considerablemente si en el metal fundido hay superficies de separación acabadas. En muchos casos las inclusiones no metálicas de difícil fusión se desprenden de las superficies contenidas en el metal fundido.

1.3.7 Carácter desulfurante del magnesio

Se conoce que el magnesio es no solo un desoxidante activo sino también un desulfurante de gran poder de reacción. Esto se puede determinar al observar los resultados en las investigaciones realizadas sobre los cálculos de variación de la energía libre para la formación de los sulfuros de magnesio vemos que sus valores se encuentran muy por debajo del ΔG^0 para la formación de Al_2S_3 ; FeS ; MnS ; y NaS .

La interacción del magnesio disuelto en el metal con el azufre se puede representar por medio de (1.3).



La constante de equilibrio de esta reacción se puede determinar por medio de la ecuación (1.4).

$$\lg p_{MgS} f_{Mg} f_S / a_{MgS} = -22112/T + 9.1 \quad (1.4)$$

Donde: p_{MgS} - presión del gas del MgS ; $f_{Mg} f_S$ - concentración de magnesio y azufre; a_{MgS} - actividad del MgS

Deduciendo las ecuaciones anteriores se observa que en el caso de que ocurra la reacción en la frontera de las fases la actividad del azufre en el metal puede ser disminuida hasta niveles de muy bajo valor. Por ejemplo a $1600^\circ C$ y $p_r 0.1$ en la salida de la burbuja del elemento reaccionante, la actividad del azufre no debe estar por encima de $2 \cdot 10^{-3}$ en el equilibrio con los gases del magnesio.

Experimentos realizados por Bigueievs [Navas, 2000] han demostrado que a las temperaturas del hierro fundido la concentración del azufre en equilibrio con el magnesio disuelto en el metal puede ser de $5 \cdot 10^{-4}$ con un contenido de magnesio disuelto en el metal de 0.23 %.

1.3.8 Desulfuración

El azufre, como es conocido, es un elemento nocivo para casi todas las aleaciones de hierro carbono. El origen fundamental del mismo lo constituyen los materiales de carga. En dependencia de la concentración de azufre, los arrabios para la fabricación de aceros y fundiciones se dividen en tres categorías: la primera, cuando su concentración no sobrepasa el valor de 0.03 %, la segunda cuando este se encuentra por debajo de 0.05 % y la menos deseable cuando presenta valores inferiores a 0.07 %.

El denominado SORELMETAL, arrabio producido específicamente para la producción de hierro con grafito esferoidal en su composición química el contenido de azufre no es mayor de 0.015 %. Bajo ninguna circunstancia, es recomendable para la obtención de hierro con grafito esferoidal, materiales de carga en los cuales la concentración de azufre sobrepase el valor de 0.03% [Karsay, 1992].

Características del azufre que permiten su eliminación del metal fundido

La actividad del azufre depende de la composición química del fundido. El carbono y el silicio aumentan dicha actividad expulsando el azufre de las microcélulas de la estructura del metal líquido. Por eso es más fácil la desulfuración de los hierros fundidos que la de los aceros. Para medir la actividad del azufre A_s^Σ es preciso tomar en consideración la influencia que ejerce sobre esta cada impureza. ($A_s^\Sigma = A_s^C A_s^{Si} A_s^{Mn}$).

El azufre es tensoactivo, por eso en la superficie de separación de las fases, la concentración del mismo es mayor que por todo el volumen de la disolución. Por eso se tiene mayor efecto en la desulfuración, en aquellos métodos que aseguren el aumento de la superficie de contacto entre el metal y el elemento desulfurante (mezclado con escoria, insuflado en el metal del desulfurante). Por otra parte la presencia en el metal de elementos tensoactivos provoca la denominada “lucha por la superficie”, donde cada elemento tensoactivo trata de ocupar la zona de separación de las fases dificultando así la reacción de desulfuración. Entre estos, el oxígeno es el principal elemento que causa dificultad en la desulfuración. Si el contenido de oxígeno en el metal se logra disminuir

hasta < 0.01% la velocidad y el grado de eliminación del azufre se incrementa bruscamente. Por otra parte, cierta cantidad de azufre puede ser oxidada y evacuada a la parte gaseosa.

Para el caso de procesos de desulfuración donde el desulfurante es impulsado por aire el azufre puede oxidarse según la reacción (1.5).



Para esta reacción la constante de equilibrio toma valor según (1.6).

$$\text{Log } K = \text{Log } P_{SO_2} / [S] \cdot O_{2g} = -294 / T - 2.8 \quad (1.6)$$

Esta reacción alcanza con rapidez el estado de equilibrio y no adquiere ningún desarrollo notable.

Elementos desulfurantes: los elementos que forman sulfuros cuya energía libre de formación (ΔG^0) es menor que la obtenida durante la formación de los compuestos de azufre con hierro, pueden servir como desulfurantes. Tales elementos son: Mn, Mg, Na, Ca y otros, como el Ce y demás MTR. Todos estos elementos se utilizan en la práctica.

Según [Peter, 2013] dentro de los principales elementos se encuentran los siguientes: carbono, silicio, manganeso, fósforo, cromo, cobre, estaño y níquel.

Durante la solidificación, el níquel actúa como un grafitizante, pero en menor grado que el cobre y en el proceso de enfriamiento es un antiferritizante de menor poder, tendiendo a formar diferentes estructuras según el porcentaje en que se agregue, así por ejemplo, con adiciones de hasta 2 % se obtiene una estructura perlítica y con adiciones de 4 - 8 % se obtiene una estructura martensítica y con adiciones del 20 % se obtiene una estructura austenítica.

1.4 Tendencias actuales en la producción de hierro nodular

Como es conocido para la obtención del hierro con grafito esferoidal se utilizaba el cerio, pero este modificador no alcanzó gran aplicación por ser deficitario y con un alto costo, a pesar de esta dificultad y de la tendencia del cerio y los metales de tierras raras de aumentar el subenfriamiento del hierro durante la cristalización, favoreciendo la formación de carburos dispersos en su estructura, el uso del cerio y metales tierras raras tuvo gran

aceptación [Iron Casting, 2013]

Según Tartera [Tartera, 2012], el modificador más difundido en la actualidad es el magnesio, ya sea en forma pura o en forma de aleación. Entre 1975 y 1980 la utilización de magnesio en comparación con el cerio aumentó en un 50 % aproximadamente.

La introducción del magnesio en forma de aleación de Ni - Mg fue uno de los métodos más difundidos y fiables en un largo periodo de tiempo, a pesar de ser el níquel un producto deficitario y costoso. Por ese motivo en los últimos tiempos se utilizan los modificadores sin níquel, principalmente si este no es necesario como elemento aleante.

Las aleaciones de Fe - Si - Mg tienen una gran utilización, a pesar de que en muchos casos limita el uso del retorno debido a la alta cantidad de azufre presente en el mismo. En Inglaterra aproximadamente el 90 % de las piezas de hierro con grafito esferoidal se obtienen con las pre-aleaciones de Fe - Si - Mg y se utilizan cerca de 7000 - 8000 toneladas de aleación. La más difundida es la aleación con 5 % de magnesio, sin embargo en los últimos tiempos se está utilizando una aleación con poco contenido de magnesio por ejemplo, con 1,7 % de magnesio, utilizando también los metales tierras raras [Navas, 2000].

En dependencia de las propiedades físico mecánicas de las pre-aleaciones (densidad, temperatura de fusión y otros) se utilizaron diferentes métodos de introducción de las aleación al metal. Uno de los métodos más difundidos es el denominado método "Sandwich", para el cual, la concentración de azufre en el caldo debe ser menor a 0.04 - 0.05 %, y presenta sus limitaciones en cuanto al uso de retorno con alto contenido de silicio. La asimilación de magnesio oscila entre el 35 y el 90 % y su mayor aplicación es en los Estados Unidos [Navas, 2000].

Es conocido que el efecto modificador disminuye principalmente entre los 5 a 10 segundos después de introducido el modificador, y que inmediatamente de ser introducido el mismo la aleación se encuentra en el denominado estado de "super- modificación". Es por eso que para un mayor aprovechamiento del efecto de la modificación se comenzó a realizar la modificación dentro del molde (in mold process). Este proceso a pesar de la disminución del metal útil debido a la pérdida del mismo en la cámara de reacción, tiene grandes ventajas en relación a otros métodos de obtención del hierro con grafito esferoidal: economía del modificador (asimilación del magnesio entre el 80 y el 90 %), simplificación

del proceso productivo, disminución del piroefecto, aumento de las propiedades mecánicas, poca presencia o eliminación casi total de carburos libres en la estructura, lo que trae como consecuencia que se pueda prescindir del tratamiento térmico [Davis K.G., 1990].

La principal desventaja del mismo es que requiere de un estricto control de la temperatura, velocidad de vertido y la utilización de un metal base con menos de 0.015 % de S.

Otro de los métodos de obtención del hierro con grafito esferoidal es el denominado Co CQ (Controlled Quality Inoculation). El principio de este proceso consiste en la introducción de un alambre de magnesio el cual penetra en la taza de vertido del molde por medio de una bobina que se desenrolla adecuadamente durante el vertido.

En este caso el efecto de modificación no se “apaga”, debido a que el hierro modificado penetra en el molde inmediatamente después de la modificación. El proceso CoCQ garantiza la obtención de piezas con la microestructura adecuada gracias a la regulación de la velocidad de introducción del modificador. Inmediatamente después de terminado el vertido se detiene la introducción del alambre de magnesio y puede ser automatizado con facilidad. Este método aún no ha logrado gran aplicación industrial. [CoCQ, 2013]

Al mismo tiempo del desarrollo de modificadores en base a Mg, Ca, Ce, MTR, fluoruros y cloruros de metales y otros ingredientes, se ha notado últimamente la tendencia de producción de hierro con grafito esferoidal modificado con magnesio puro. Los trabajos en esta dirección, se han realizado continuamente durante más de 40 años. Esto se debe fundamentalmente al aspecto económico, así como, a la falta de restricción en el uso del retorno y el azufre en la aleación base. Estos procesos permiten disminuir notablemente la velocidad de ebullición del magnesio y esto garantiza alta fiabilidad y estabilidad en la obtención del hierro nodular [Bernart, 2013].

El método del convertidor se destaca por lo económico y se puede prescindir de la desulfuración del metal base. Este proceso es utilizado en más de 40 países y el 8 % de la producción de hierro con grafito esferoidal se obtiene mediante el mismo. La desventaja fundamental de este radica en el uso imprescindible de un instrumental especial y sumamente complejo, así como un gran piroefecto y expulsión de humo. [Broks, 2013].

El proceso MAP consiste en la introducción del magnesio puro, aislado totalmente por medio de un material refractario en forma de campana la cual solo permite el contacto de

este con el metal base por medio de orificios hasta 120 realizados en unos de los lados de la misma. La concentración de azufre en el metal base se permite hasta 0.05 % y la asimilación del magnesio es entre el 30 y el 60 %. Mediante el proceso MAP hasta 1998 se habían producido en Francia 13 millones de toneladas de hierro con grafito esferoidal.

El método de aplicación del magnesio puro elaborado por la firma FOSECO, se basa en la introducción del modificador y 43 - 45 % de coque metalúrgico, este se coloca en una cazuela especial, la cual posee una cámara separada del resto de la cazuela en la que se coloca el magnesio y el coque (de esto proviene el Mg coque). Este proceso se utiliza para la modificación del hierro con 0.1 - 0.15 % de azufre sin desulfuración previa. El tiempo de un ciclo es de 5 - 9 minutos y el coeficiente de asimilación del magnesio es de aproximadamente 50 %. Este proceso tiene alta divulgación en Estados Unidos, Canadá y algunos países de Europa occidental [Navas, 2000].

Junto con los nuevos métodos, se continuaron utilizando y modernizando los métodos de modificación en autoclaves bajo presión. El contenido de azufre inicial, se permite hasta el 0.15 %, la asimilación del magnesio es de aproximadamente el 70 %. Este proceso es ampliamente utilizado en Japón donde el 60 % de las piezas de hierro con grafito esferoidal se obtienen con el empleo de la autoclave. La tendencia de obtención del hierro con grafito esferoidal con el uso de magnesio puro en los últimos tiempos tiende a aumentar, esto sucede debido a que el magnesio no es un material deficitario.

El análisis demuestra que en la actualidad no se ha creado un método universal de modificación que satisfaga las diferentes condiciones de producción de las piezas. Se puede vaticinar que la producción de hierro con grafito esferoidal se desarrollará en las siguientes direcciones básicas; utilización del magnesio preferentemente puro y en composición con pre-aleaciones; aumento del uso de las pre-aleaciones que contengan metales tierras raras, fluoruros, cloruros y otros elementos; notable desarrollo de los métodos de modificación en el molde y creación de métodos de modificación ininterrumpidos, así como la mecanización y automatización de los procesos tecnológicos de elaboración de las aleaciones.

1.5 La producción de hierro nodular en Cuba

La producción de hierro con grafito esferoidal en nuestro país comienza a finales de la década del 70. En la empresa Sidero - Metalúrgica "Libertad" donde se realizaron pequeñas producciones por el método "Sandwich". La obtención del arrabio no era difícil en ese tiempo y la carga que fue utilizada era la adecuada. El principal problema para lograr estabilizar este método consistió en la necesidad de cazuelas apropiadas y de un dinamómetro u otro instrumento que garantizara el control del peso del metal introducido en la cazuela. Esta carencia trajo como consecuencia que en unos casos no se lograra la nodulización por insuficiente cantidad de aleación y en otros se utilizara mucha cantidad de la misma, lo que influyó en la economía del proceso. A principios de los años 80 se detuvo la producción de este material en la mencionada empresa.

En el año 1985 la planta de fundición de la entonces Empresa de Implementos y Remolques Agrícolas "Héroes del 26 de Julio" pudo realizar una colada de hierro con grafito esferoidal utilizando el método "Sandwich". La principal dificultad en ese momento, consistió en la necesidad de fundir el metal base en un horno de arco con revestimiento básico, esto se realizó producto de la necesidad de desulfurar el metal, ya que el contenido de azufre promedio en la empresa era de 0.05 %, algo alto para este tipo de producción.

Debido a la producción en el mencionado agregado de fusión, el conteo de nódulos obtenido fue insuficiente, las propiedades mecánicas no se comportaron estables en todos los moldes, las cazuelas de vertido existentes eran de mucha capacidad; esto dificultaba su maniobrabilidad produciendo el "apagado" del magnesio. Por esos motivos no se realizó otro intento de realizar este tipo de producción.

En los inicios del año 1981, la Empresa UNECA Motors de Ciudad de la Habana, comenzó la producción de hierro con grafito esferoidal para la obtención de piezas para la industria automotriz: volanta, caja diferencial, bielas y otras. Se logró la obtención de aleaciones tipo 42-12, 50-6, 60-2, 70-2 y 80-2 por la norma ASTM. Para su producción se utilizó una variante del método "Sandwich". Esta consistía, en el recubrimiento del nodulizante con un revestimiento y después del vertido se pincha con una lanza que rompe el mismo para

iniciar su contacto con el metal. Esto se hizo necesario por la carencia de cazuelas apropiadas para evitar el piroefecto.

Las principales dificultades tecnológicas durante la aplicación del proceso en la mencionada empresa fueron la necesidad de cazuelas apropiadas, pues las existentes no cumplen los requisitos para la aplicación del método "Sandwich" y al aplicarse la tecnología con recubrimiento del nodulizante disminuye la productividad y ocurre a menudo el "apagado" del nodulizante. Por otra parte, al comenzar la falta del arrabio para la producción se introdujo el hierro sintético, entonces el carbono equivalente (C_e) obtenido fue muy bajo y aparecieron dificultades en el conteo de nódulos e inestabilidad en las propiedades mecánicas obtenidas. En el año 1993 se detuvo la producción debido de las dificultades mencionadas.

En el año 1991 un colectivo de profesores de la CUJAE realizó algunas producciones de cigüeñales para el moto-compresor marca "PRES-KOL" aplicando el método "In-mold". Fue utilizado un nodulizante granulado de la FOSECO marca NODULANT IV. Se modificaba en cámaras en forma de paralelepípedo en el semi - molde inferior. Las principales dificultades comenzaron con la desaparición del arrabio en el mercado nacional además de la baja eficiencia de la nodulización debido al tipo de cámara utilizado. Las investigaciones en referencia al tema se detuvieron por falta de un patrocinador que costeara los gastos de la misma.

En el año 2003, el Ingeniero Aerles Batista Cabrera del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería en la Universidad de Holguín, en su tesis doctoral realiza un estudio y demuestra la factibilidad de la utilización del método "In-mold" con cámara redonda en el molde inferior, lo cual posibilita la utilización de un mismo caldo fundido para la producción de piezas de hierro gris y piezas de hierro nodular [Batista^a, 1999; Batista^b, 1999; Batista^c, 1999; Batista^a, 2003; Batista^b, 2003].

Son varios los investigadores que han trabajado este tema, Dunks 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 metal, en correlación con el magnesio presente en el nodulizante para las condiciones particulares requeridas del metal. Se ha establecido [Genderevich N., 1999], 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.

Para realizar esta idea deben ser tomados en cuenta dos requerimientos fundamentales: (a) la aleación debe disolverse con prontitud y continuar con una concentración fija y uniforme desde el inicio hasta el fin del vertido; y (b) los residuos de aleación sin disolver no deben dejarse arrastrar hacia el interior de la pieza.

Para satisfacer estas condiciones, se han propuesto varias soluciones coincidiendo todas en el punto que, la aleación debe ser agregada en la forma física más apropiada, es decir, en una sola pieza, en granos sueltos o con filtros inoculantes y granos compactos, según sea necesario [Dunks, 1976].

Una solución satisfactoria al problema de la disolución uniforme es la presentada por Dunks y McCaulay la 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. 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: [Bernart, 2013].

- Alto aprovechamiento de la 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, estas 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.

1.6 Conclusiones

1. La producción de hierro con grafito esferoidal, ha crecido a nivel mundial y su tendencia sigue al crecimiento. Su aplicación fundamental es para tuberías y como sustituto de piezas fundidas de aceros al carbono y de hierro fundido. No existe un método de obtención que pueda calificarse como superior a los otros, cada fabricante adopta uno en dependencia de sus particularidades y condiciones para la fabricación.
2. La experiencia existente en nuestro país en la producción de hierro con grafito esferoidal es escasa. Las dificultades materiales para la aplicación de su producción, provocaron la no existencia de un método y procedimiento científicamente fundamentado para la ejecución de una tecnología de obtención de hierro con grafito esferoidal, que garantizara la producción estable del mismo.
3. Debido a las ventajas que posee la aplicación del método “Sandwich” y bajo las características específicas de la EFAH de Holguín se entiende que este es el idóneo para su introducción en la industria.

Capítulo 2. MATERIALES Y MÉTODOS PARA LA PRODUCCIÓN DE PIEZAS DE HIERRO NODULAR

2.1 Introducción

En el presente capítulo se exponen los materiales y métodos utilizados para la fusión del hierro gris en hornos de cubilote, así como se dan los parámetros necesarios para el diseño de la investigación, los materiales y equipos, con sus características, para las pruebas de composición química, resistencia y metalografía.

2.2 Producción de hierro en el horno de cubilote de la EFAH de Holguín

La Empresa de Fundición Acero - Hierro de Holguín posee un taller de fundiciones ferrosas en el cual se encuentra ubicado un horno de cubilote. El cubilote es un horno de caba dentro del cual ocurre el quemado del coque. El calor desprendido por este, ante todo, garantiza las posibilidades de fusión de la carga metálica y la obtención del hierro fundido como se observa en la Figura 2.1.



Figura 2.1. Horno de cubilote de la EFAH de Holguín.

El aire impulsador que sale de las toberas (con el 21% O_2 y 79% N_2 del volumen) atraviesa la cama de coque y el oxígeno entra en acción con el carbono del coque en una reacción exotérmica. El calor desprendido por esta reacción calienta los gases del horno, los cuales al salir de la zona de la cama de coque por encima de las toberas funden la carga metálica y el fundente que descansa sobre esta. Las gotas del metal líquido y la escoria pasan a

través del coque incandescente (al rojo) donde se sobrecalienta cayendo al crisol, ocurriendo una carburación intensiva. Luego la escoria y el hierro fundido se sacan del horno.

A medida que se funden las capas de la carga metálica ininterrumpidamente ocurre el quemado del coque y la altura de la cama del coque disminuye. Para mantener el nivel inicial de la cama de coque, por cada porción de la carga metálica se introduce una carga de coque, la cual después de fundida la carga metálica, según su orden irá a formar parte de la cama de coque. Es decir, durante el fundido ocurre una oscilación de la zona de fusión, pero su altura media se mantiene a un nivel determinado.

En casos aislados no se usa una carga ordenada de niveles de coque y metal con fundente, sino una carga donde se mezclan el coque, el metal y el fundente. En este caso la zona de fusión disminuye y también disminuye el nivel de la cama de coque por encima de las toberas. A medida que ocurre la fusión en la parte alta del cubilote ocurre una carga continua de metal, fundente y coque, lo que garantiza un proceso duradero de la obtención del hierro fundido.

2.2.1 Procedimiento de fusión en horno de cubilote de la EFAH de Holguín

- a) **Estructura metálica del cubilote:** consiste en un cilindro vertical, formado por planchas de acero soldadas de 6 a 13 mm de espesor, montadas por secciones sobre una plancha base, que a su vez es soportada por cuatro columnas de apoyo, las cuales están fijadas al cimiento. En el centro de la plancha base se encuentra una abertura de diámetro 720 mm igual al diámetro interior del refractario del cubilote, donde se coloca la tapa de cierre y se fija por medio de un puntal.
- b) **Piquera u orificio de descarga:** se encuentra en la superficie del cilindro, al frente de la posición de trabajo, a una altura de 120 mm sobre la plancha base. En la misma situación se encuentra el canal de descarga con una inclinación de 10 grados hacia abajo para que el metal corra libremente.
- c) **Bigotera de escoria:** es un orificio situado a 90 grados de la boca de descarga, a una distancia de 120 mm por debajo de las toberas, con un canal de descarga más corto que el de la piquera.

d) **Toberas:** presenta cinco toberas y están situadas a una altura de 635 mm desde la plancha base hasta la parte inferior de las mismas. Esto constituye la altura de la cuba o crisol colector de metal. Las toberas son ventanas de mayor ancho que altura, cuya área total (A_{I T}) será igual al 20 % del área interior del cubilote.

La forma de la tobera será rectangular, con mayor ancho que altura, rectas en la parte exterior del cubilote y cónicas aumentando el ancho y disminuyendo la altura en el interior de cubilote, manteniendo el área con relación al eje tangencial del cubilote.

e) **Mirillas:** se encuentran en el extremo exterior de las toberas, compuestas por ventanillas de cristal, por donde se observa el proceso de la fusión y a través de ellas se puede barretar el coque para su mejor descenso.

f) **Ventana de trabajo:** se encuentra a 180 grados con relación a la piqueta y se protege con refractario durante la fusión. A través de la ventana se realiza la reparación del crisol del horno y se construye el piso.

g) **Caja de aire:** comienza en la parte superior de las toberas y tendrá una altura de 5.70 dm y un ancho de 3.60 dm, separado a 100 mm desde la pared del cubilote, el fondo de la caja de aire se comunica con las toberas para el suministro de aire al horno.

h) **Boca de carga:** se encuentra a 180 grados con relación a la piqueta, en la parte posterior del horno, a una altura tomada desde el piso o solera hasta su borde inferior, igual a seis veces el diámetro interior del cubilote. Su tamaño varía de acuerdo al método de carga utilizado.

i) **Chimenea:** la altura de la chimenea debe sobresalir el techo del edificio con su correspondiente cobertura a la que se le adiciona un apaga chispas.

j) **Ventilador:** pueden ser de tipo centrífugo o de émbolo rotatorio, cuya capacidad deberá estar de acuerdo al volumen de aire necesario según la productividad del cubilote.

k) **Datos técnicos:** (a) Diámetro interior del cubilote: 7.2 dm, (b) Área interior del cubilote: 41 dm², (c) Altura de la cuba: 5.7 dm, (d) Altura de la tobera: 7.4 dm.

l) **Cálculo de la productividad:** es igual al área interior del cubilote por el factor empírico, según la relación, carga de hierro-coque, se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Factor empírico.

Relación	Factor
6/1	0.047
8/1	0.0622
10/1	0.072
12/1	0.0925

Tomando una relación de 10/1 el cubilote de 7.2 dm de diámetro con un área de 40.7 dm² podrá reducir: $40.6944 \text{ dm}^2 * 0.072 = 2.9 \text{ t/h}$. La carga de coque del cubilote es fijada y determinada, variando solo el tamaño del coque de acuerdo con el diámetro del horno. En la práctica se ha demostrado que la mejor operación se obtiene cuando el tamaño del coque es desde 1/12 hasta 1/10 del diámetro del cubilote. Para el cubilote el diámetro del coque será desde 720/12 hasta 720/10, o sea, de 60 a 72 mm respectivamente.

m) **Cantidad de coque necesario por carga:** la altura de la carga de coque debe estar entre 1 y 2 dm. La media será de 1.58 dm. El volumen de coque se expresa en (2.1).

$$V_{\text{coque}} = 40.6944 \text{ dm}^2 * 1.58 \text{ dm} = 64.3 \text{ dm}^3 \quad (2.1)$$

En la práctica se utiliza para cargar el coque un recipiente con la capacidad volumétrica obtenida, sin la necesidad de pesar el mismo en repetidas ocasiones. Si se desea determinar el peso de la carga de coque (Tabla 2.2), hay que tomar en consideración que el peso del mismo varía según su tamaño, para un volumen determinado.

Tabla 2.2. Peso del coque.

Tamaño del coque, [mm]	Peso, [kg/dm ³]
25-60	0.53
60-90	0.48
75-100	0.45
100-175	0.43

En nuestro caso para un coque entre 60 y 72 mm corresponde al grupo dos, cuyo peso es de 0,48 kg/dm³. El peso de la carga de coque será de 31 kg. La cantidad de coque debe estar dentro de los parámetros que expresa la Tabla 2.3, donde se indican los parámetros del coque.

Tabla 2.3. Composición del coque.

Tamaño del coque, [mm]	Peso, [kg/dm ³]
Carbón fijo	Sobre 86 %
Cenizas	Menor del 12 %
Azufre	Menor del 0.8 %
Materias volátiles	Menor del 2 %
Humedad	Menor del 3 %

n) **Determinación de la carga metálica:** como norma establecida la carga de coque se mantendrá fija, variándose siempre la carga metálica de acuerdo a la relación que se necesite aplicar. Los pedazos de la carga metálica no deben ser mayores de 1/3 del diámetro interior del cubilote. Como la relación que hemos seleccionado es de 10/1 la carga metálica será de 310 kg.

Cuando se desea obtener hierro con grafito esferoidal, donde se utiliza un porcentaje de chatarra de acero, será necesario disminuir el peso de la carga metálica de la siguiente manera: (a) 8 % menos del peso total de la carga metálica para 20 % de chatarra de acero; (b) 14 % menos del peso total de la carga metálica para 40 % de chatarra de acero; y (c) 20 % menos del peso total de la carga metálica para 60 % de chatarra de acero.

En este caso el peso de la carga metálica se expresa en (2.2).

$$Q_{\text{metálica}} = 310 \text{ kg} - \frac{(310 * 20)}{100} = 248 \text{ kg} \quad (2.2)$$

El espesor de la chatarra de acero nunca debe ser menor de 13 mm, espesores menores se oxidan fácilmente, aportando poco metal y mucha escoria.

o) **Fundente:** se utiliza generalmente de 1.5 a 2.2 % por kg de metal cargado y dependiendo del grado de oxidación de los materiales de la carga metálica se toma hasta un 3 % (ver 2.3).

$$Q_{\text{caliza}} = \frac{248.0 * 3}{100} = 7.44 \text{ kg} \quad (2.3)$$

El tamaño del fundente debe estar entre 25 y 75 mm y se colocará sobre la carga metálica. Como fundente se utiliza generalmente la caliza. De 56 a 85 % de Ca CO_3 (en forma de gravilla).

- p) **Cantidad de aire:** el gasto de aire en m^3 se calcula de acuerdo al peso de la carga de coque. Teóricamente para la combustión completa de 1 kg de coque se requieren 8 m^3 de aire, referido a 0°C y 760 mm de la columna de mercurio. En la práctica se prevé un ligero exceso referido a una temperatura media de 15°C y se toman 9 m^3 , considerando la resistencia y las fugas en el sistema.

En este caso, se necesita un volumen de aire por carga de coque según expresa la fórmula (2.4).

$$V_{\text{aire}} = 31.0 * 9 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} = 279.0 \text{ m}^3 \quad (2.4)$$

Por tanto, para producir 1 t/h de metal líquido, necesitamos un volumen de aire según (2.5).

$$\text{Carga} = \frac{1000 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}{248.0 \text{ kg de carga metálica}} = 4.03 \text{ carga/h de coque} \quad (2.5)$$

$$V_{\text{aire}} = 4.03 * 279.0 \text{ m}^3 = 1124,37 \text{ m}^3 \text{ de aire / hora} \quad (2.6)$$

- q) **Altura de la cama de coque:** esta puede variar desde 710 y 1345 mm, sobre el borde superior de las toberas. La altura depende de la presión de aire. Esta medida en la caja de aire puede variar desde 380 a 550 mm de H_2O para cubilotes de 720 mm de diámetro, por lo que la altura de la cama de coque podrá obtenerse por la fórmula empírica (2.6).

$$(\sqrt{P * 124}) + 150 = \text{altura de la cama de coque} \quad (2.7)$$

Para el cálculo tomamos las 2 presiones (2.7 y 2.8).

$$(\sqrt{38 * 124}) + 150 = 4862 \text{ mm} \quad (2.8)$$

$$(\sqrt{55 * 124}) + 150 = 6970 \text{ mm} \quad (2.9)$$

En la práctica es preferible tomar siempre la altura mayor basados en la experiencia acumulada en el trabajo con este horno. La altura de la cama de coque es de 6970 mm.

2.3 Método utilizado para la nodulización en cazuela por el método “Sandwich”

Según Suárez [Suárez, 2013], existen varios métodos de introducción del magnesio en la cazuela pero uno de los más empleados es el método “Sandwich” que se muestra esquemáticamente en la Figura 2.2. Según las recomendaciones, el tiempo de reacción debe estar entre 90 y 150 segundos, además la cazuela debe tener una altura superior a dos veces el diámetro.

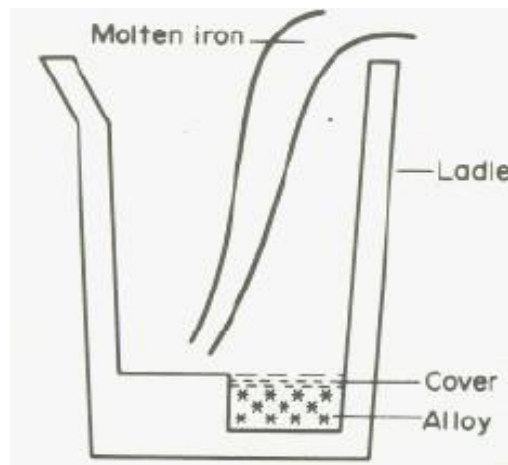


Figura 2.2. Introducción del magnesio en la cazuela por el método Sandwich.

Posteriormente, es necesaria la inoculación con el objetivo de evitar el blanqueamiento y para aumentar la vida del proceso de nodulización. La colada se debe realizar lo más rápido posible para evitar se pierda el efecto de la nodulización y que el metal pierda temperatura.

2.3.1 Vertido del metal en el molde con el inoculante en el sistema de alimentación

Luego de realizada la nodulización en la cazuela, el metal es vertido en los moldes donde se desarrollará la inoculación con el fin de que los nódulos no retornen a grafito laminar (Figura 2.3).



Figura 2.3. Vertido de los moldes.

Diseño de la cámara en el sistema de alimentación.

Debido a que la inoculación del metal proveniente de la cazuela se realiza dentro del molde, es indispensable que este posea una cavidad especial en la cual se lleve a efecto dicho tratamiento (generalmente se conoce como cámara de reacción) (Figura 2.4).

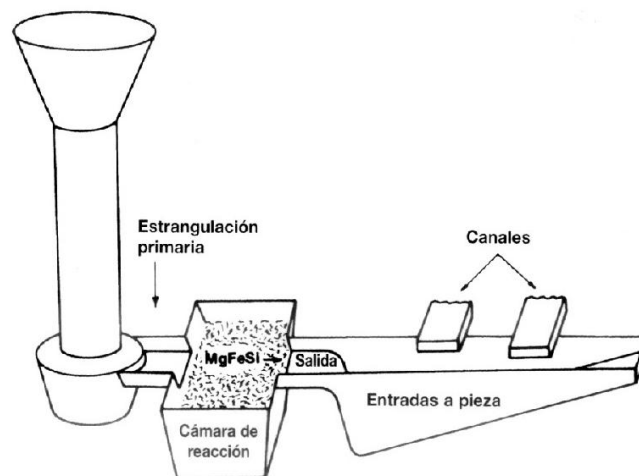


Figura 2.4. Proceso de inoculación en la cámara dentro del escoriador.

Como ya se mencionó, la cámara de reacción ocupa un papel muy importante en el proceso, por lo que requiere de un diseño adecuado. Además, de ella dependen muchos factores como son: velocidad de vertido, factor de solución, disolución de la aleación inoculante, etc. Cabe mencionar que el tamaño de la cámara de reacción varía con el sistema de alimentación empleado durante el trabajo.

El factor básico de una buena cámara para la inoculación en el molde es la sección horizontal, la cual debe ser prácticamente constante en todas las alturas. Es importante que otros elementos de diseño de la cámara sean elegidos apropiadamente para

satisfacer los dos requerimientos siguientes: (a) la cámara debe permitir un flujo regular del hierro sobre la aleación, para facilitar su disolución gradual; y (b) 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 el choque violento del hierro que fluye dentro de la cámara contra un área localizada de aleación nodulizante. Esto provocará el desplazamiento y proyección de granos, con la consiguiente formación de inclusiones. Esto también puede generar vértices y algunas veces esquinas muertas donde la disolución es extremadamente lenta o totalmente incompleta.

Generalmente, el diseño de la cámara debe garantizar que la caída del hierro a la cámara no posea una diferencia de nivel excesiva más de 20 mm. Además, es preferible ensanchar la sección de entrada y situar la salida a un nivel más alto que el de la entrada, algunas veces con la salida por el techo de la cámara. La sección de salida debe ser al menos un 10 % más pequeña que la de entrada. El efecto de estrangulamiento facilitará la disolución de la aleación en sus fases subsiguientes.

En la Figura 2.5 aparece la alimentación de dos piezas, donde la inoculación se desarrollará en el sistema de alimentación.

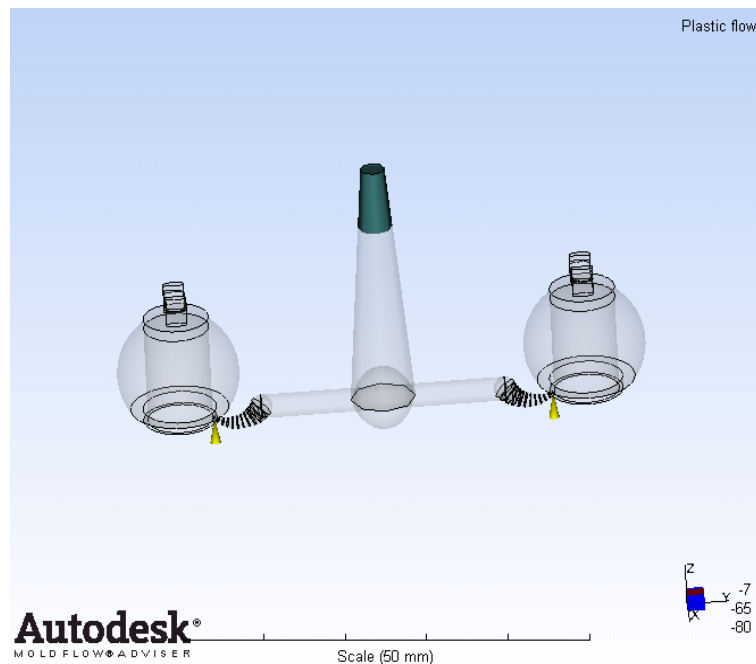


Figura 2.5. Alimentación de dos piezas.

2.4 Análisis granulométrico de la cola de níquel de la ERRL

En ausencia de posibilidades económicas para la instalación del equipamiento del laboratorio necesario para el tratamiento de la cola, se requiere de la utilización de la base adecuada del laboratorio existente en el CIS (Centro de Investigaciones Siderúrgicas de Nicaro), con la que se garantiza la realización de todo tipo de tratamiento a minerales y a la cola en específico, ensayos químicos y selección del tamaño de partícula determinado para comenzar el desarrollo experimental.

En primer lugar, se experimentó realizando un análisis de valores extremos de granulometría (- 50 mm), con el fin de definir el intervalo de variación de este parámetro que se seleccionará. Se utilizó una cola con una granulometría de - 50 mm y luego se realizó la trituración. La selección de la granulometría se efectuó en un juego de tamices, con módulo $\sqrt{2} = 1,41$ de la Escala de Tayler (Gran Bretaña).

A partir de un muestreo no probabilístico intencional se trabajó con la muestra (1000 kg) seleccionada, mediante un análisis granulométrico se determinaron los tamaños de partículas predominantes, dados por la uniformidad y peso del mineral seleccionado. Para la selección del tamaño de partícula predominante en cada uno de los grupos seleccionados se utilizó el siguiente juego de tamices según la Escala de Tayler.

Malla:

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15

Abertura (mm):

62,7; 44,5; 31,5; 22,4; 15,8; 11,2; 7,9; 5,6; 4,0; 2,8; 1,2; 0,53 ; 0,21;0,11 ; 0,05

El conjunto de tamices se hizo vibrar durante 15 min aproximadamente y luego se determinó el peso de las partículas que quedaron retenidas en cada uno de los tamices y el porcentaje que representan en relación con el peso total de la muestra ensayada. Este tipo de ensayo da una idea rápida de las características granulométricas de la cola utilizada. Por las razones anteriores los experimentos se realizan para tres grupos de tamaño de partículas: (a) menores de 7.99 mm; (b) mayores de 7.99 y menores de 22.4 mm; y (c) mayores que 22.4 mm y hasta 50 mm.

Según estudios realizados anteriormente se demostró que cuando se utilizan tamaños de partículas de minerales o de cola de níquel en la cazuela, ocurre lo siguiente:

- Las partículas menores de 7.99 mm, al entrar en contacto con el metal vertido en la cazuela, por su poco peso quedan flotando junto con la escoria y por lo tanto, solo se aprovecha un porcentaje no significativo de la cola, por lo que este tamaño de partícula no es recomendable.
- Las partículas mayores de 7.99 y hasta 30 mm poseen la mayor velocidad y efectividad de fusión, por lo que atendiendo a que el valor 22.4 mm es el de mayor cantidad retenida en los tamices, se determina su utilización para realizar las pruebas.
- Las partículas mayores que 22.4 mm y hasta 50 mm, por su gran tamaño demoran en fundir y retardan el proceso, algo no recomendable para la nodulización efectiva.

2.5 Diseño del experimento y equipamiento para la determinación de la composición química del hierro obtenido

Planificación de los experimentos (Tabla 2.4)

Factores comunes de influencia en la obtención del hierro nodular:

- Tv: Temperatura de vertido, (°C)
- Cq: Composición química (C, Si, Mn, P, S) %
- Tc: Tipo de cola de níquel
- T.Inoc.: Tipo de inoculante
- C. Cola: Cantidad de cola de níquel, (g)
- TP cola: Tamaño de la partícula de la cola, (mm)

Los factores que pueden ser variados a voluntad están dados por TP, C.Cola y Tv.

Sin embargo, desde el punto de vista de organización del proceso productivo resulta deseable la asignación de un valor fijo para la variable TP cola, pues el almacenamiento y la manipulación de diferentes tamaños de partícula de la cola están asociados a serias dificultades organizativas. El valor más adecuado de TP cola solo puede encontrarse

como resultado de la modelación matemática y la búsqueda del valor de este parámetro que asegura la mayor eficacia, en el mínimo tiempo, para las condiciones de composición media de los restantes parámetros de influencia.

Del tamaño de partícula dependen algunos parámetros que van desde la tecnología de ubicación de la cola hasta la productividad, dada por la capacidad de reacción del Mg de la cola con el carbono, azufre y oxígeno.

Tabla 2.4. Planificación de los experimentos.

Variante			
Diseño factorial			
4 x 3		2 variables independientes	
TP cola = 22.4 mm			
<p>Tv: Temperatura de vertido. Cq: Composición química. Tc: Tipo de cola de níquel. T.Inoc.: Tipo de inoculante. C. Cola: Cantidad de cola de níquel.</p>			
10 Réplicas		120 Experimentos	
Factores	Niveles		
C. Cola	150; 200; 250 y 300 g		
T. inoc.	0.5; 1.5 y 2.5 mm		

Las muestras fueron tomadas al final de cada colada para la toma de muestras al hierro gris normal, con la ayuda de la cuchara de muestreo y directamente de la cuchara de vertido, se sacaron varias muestras y se trasladaron hacia el laboratorio de análisis de composición química. Las muestras de hierro nodular para análisis de composición

química se tomaron de las probetas ya fundidas en los moldes, en ambos casos el equipo para determinar la composición química utilizado fue Espectrómetro FRXPW 2004 de la firma Holandesa PHILLIPS, que realiza los ensayos por fluorescencia de rayos X. En el mismo se realizan análisis de composición química a los aceros, hierros y escoria de aceros inoxidable, al carbono, FeCr, FeMn, caliza y otros, con posibilidades de determinación analítica desde el boro hasta el uranio.

2.6 Características técnicas de la máquina universal de prueba a tracción, compresión y flexión DNS – 200

Esta máquina (Figura 2.6) fue instalada recientemente en el laboratorio de resistencia de los materiales de la Universidad de Holguín “Oscar Lucero Moya”. Fue diseñada y construida en el Changchun Research Institute for Testing Machine (CRITM) de la República Popular China, por lo que cumple con requerimientos necesarios de la National Standards of People’s Republic of China GB10128 “Metallic materials traction test at room temperature”.

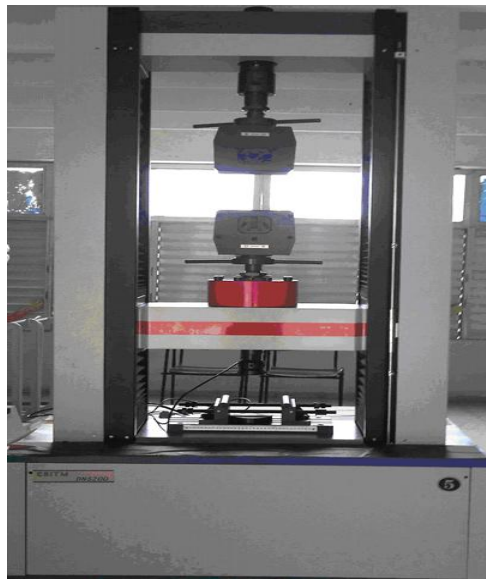


Figura 2.6. Máquina de ensayo DNS-200.

2.6.1 Preparación por maquinado de las probetas

Las probetas necesarias para los ensayos a tracción deben cumplir con una serie de especificaciones que puedan ser procesadas en la máquina de ensayo. Esta máquina sigue las especificaciones para el dimensionado de las probetas según la norma E8-04

(ASTM). Objetivamente las dimensiones que influyen directamente en los resultados son el diámetro y la longitud efectiva, por lo que se decidió, para facilitar el ensayo, por las dimensiones expresadas en la Figura 2.7.

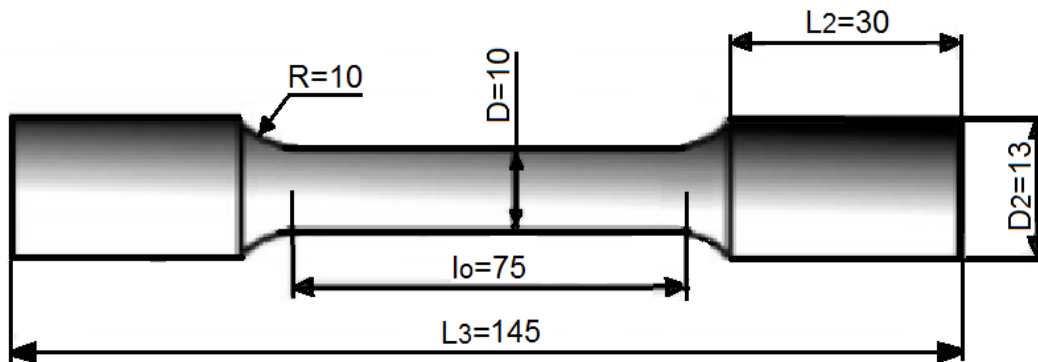


Figura 2.7. Dimensiones definidas para las probetas.

Para darle a las probetas las dimensiones finales se realizó un proceso de torneado desde las dimensiones de 25 x 25 mm de la sección cuadrada de la pieza en bruto, hasta los 13 mm de diámetro en la zona de agarre y 10 mm en la zona efectiva, dejando una longitud efectiva de 75 mm.

2.7 Equipamiento para los ensayos metalográficos

El objetivo principal de los ensayos metalográficos es la determinación de la microestructura, inclusiones, tratamientos térmicos a los que haya sido sometido, micro-rechupes, con el fin de determinar si dicho material cumple con los requisitos para los cuales ha sido diseñado. Además, encontraremos la presencia de material fundido, forjado y laminado. Se conocerán la distribución de fases que componen la aleación y las inclusiones no metálicas, así como la presencia de segregaciones y otras irregularidades.

Para preparar las muestras metalográficas se siguieron las siguientes operaciones:

- a) **Corte:** el tamaño de la muestra siempre que se pueda debe ser tal que su manejo no encierre dificultad en la operación. Existen diversos tipos de cortes:
 - a. Corte por sierra. Produce severas condiciones de trabajo en frío y no es ventajoso. El corte mediante este método ocasiona superficies irregulares con

ondulaciones excesivamente altas, dando como efecto más tiempo de aplicación de las técnicas de preparación de las muestras. Generalmente este tipo de corte es utilizado para extraer probetas de piezas muy grandes, para poder luego proceder con el corte abrasivo y adecuar la probeta a los requerimientos necesarios.

- b. Corte por disco abrasivo. Este tipo de corte es el más utilizado, ya que la superficie resultante es suave y el corte se realiza rápidamente. Los discos para los cortes abrasivos están formados por granos abrasivos (tales como óxido de aluminio o carburo de silicio), aglutinados con goma u otros materiales. Los discos con aglutinantes de goma son los más usados para corte húmedo, los de resina son para corte en seco.
- b) **Montaje de muestras:** con frecuencia, la muestra a preparar por sus dimensiones o por su forma, no permite ser pulida directamente, sino que es preciso montarla o embutirla en una pastilla. El material del que se componen estas puede ser lucita (resina termoplástica) o bakelita (resina termoendurecible).
- c) **Desbaste:** después de montada la probeta se inicia el proceso de desbaste sobre una serie de hojas de esmeril o lija con abrasivos más finos, sucesivamente. El proceso de desbaste se divide en tres fases: desbaste grosero, desbaste intermedio y desbaste final. Cada etapa de preparación de probetas metalográficas debe realizarse muy cuidadosamente para obtener al final una superficie exenta de rayas.
- a. Desbaste grosero. Es el desbaste inicial que tiene como objetivo planear la probeta, lo cual puede hacerse a mano y aún mejor con ayuda de una lijadora de banda. El papel de lija utilizado es de carburo de silicio con granos de 240 o papel de esmeril número 1. En cualquier caso, la presión de la probeta sobre la lija o papel de esmeril debe ser suave, para evitar la distorsión y rayado excesivo del metal.
 - b. Desbaste intermedio. Se realiza apoyando la probeta sobre el papel de lija o de esmeril, colocado sobre una mesa plana o esmeriladora de banda fija. En esta fase se utilizan los papeles de lija No. 320/340 y 400 o de esmeril No. 1/O y 2/O.
 - c. Desbaste final. Se realiza de la misma forma que los anteriores, con papel de lija No. 600 o de esmeril No. 3/O. En todo caso, en cada fase del desbaste debe

tomarse siempre en cuenta el sistema refrigerante. Cada vez que se cambie de papel, debe girarse 90 grados, en dirección perpendicular a la que se seguía con el papel de lija anterior, hasta que las rayas desaparezcan por completo. Se avanza y se facilita mucho las operaciones descritas utilizando una pulidora de discos, a las que se fija los papeles de lija adecuado en cada fase de la operación. Las velocidades empleadas varían de 150 a 250 rpm. En otro caso se pueden utilizar desbastadoras fijas o de bandas giratorias.

d) Pulido

- a. Pulido fino. La última aproximación a una superficie plana libre de ralladuras se obtiene mediante una rueda giratoria húmeda cubierta con un paño cargado con partículas abrasivas seleccionadas en su tamaño. En éste sentido, existen muchos abrasivos, prefiriendo a gamma del óxido de aluminio para pulir metales ferrosos, los basados en cobre u óxido de cerio para pulir aluminio, magnesio y sus aleaciones. Otros abrasivos son la pasta de diamante, óxido de cromo y óxido de magnesio. La selección del paño para pulir depende del material que se va a pulir y el propósito del estudio metalográfico.
- b. Pulido electrolítico. Es una alternativa de mejorar al pulido total pudiendo reemplazar al fino pero muy difícilmente al pulido intermedio. Se realiza colocando la muestra sobre el orificio de la superficie de un tanque que contiene la solución electrolítica previamente seleccionada, haciendo las veces de ánodo. Como cátodo se emplea un material inerte como platino, aleación de níquel, cromo, etc. Dentro del tanque hay unas aspas que contienen en constante agitación al líquido para que circule permanentemente por la superficie atacándola y puliéndola a la vez. Deben controlarse el tiempo, el amperaje, el voltaje y la velocidad de rotación del electrolito para obtener un pulido satisfactorio. Muchas veces después de terminado este pulido la muestra queda con el ataque químico deseado para la observación en el microscopio.
- e) **Ataque:** permite poner en evidencia la estructura del metal o aleación. Existen diversos métodos de ataque pero el más utilizado es el ataque químico. El ataque químico puede hacerse sumergiendo la muestra con cara pulida hacia arriba en un reactivo adecuado, o pasar sobre la cara pulida un algodón embebido en dicho reactivo. Luego

se lava la probeta con agua, se enjuaga con alcohol o éter y se seca en corriente de aire. El fundamento se basa en que el constituyente metalográfico de mayor velocidad de reacción se ataca más rápido y se verá más oscuro al microscopio y el menos atacable permanecerá más brillante, reflejará más luz y se verá más brillante en el microscopio.

f) Observación

g) Fotomicrografía

2.7.1 Métodos para determinar el tamaño de grano

Una de las mediciones micro-estructurales cuantitativas más comunes es aquella del tamaño de grano de metales y aleaciones. Numerosos procedimientos han sido desarrollados para estimar el tamaño de grano, estos procesos están sintetizados en detalle en la norma ASTM E112. Algunos tipos de tamaño de grano son medidos, tamaño de grano de la ferrita y tamaño de grano de la austenita. Cada tipo presenta problemas particulares asociados con la revelación de estos bordes de manera que puede obtenerse un rango exacto. Los principales métodos para la determinación del tamaño de grano recomendados por la ASTM (American Society for Testing and Materials) son:

a) Método de comparación

Mediante el método de prueba y error se encuentra un patrón que coincide con la muestra en estudio y entonces se designa el tamaño de grano del metal por el número correspondiente al número índice del patrón mixto. Se tratan de manera semejante, en cuyo caso se acostumbra especificar el tamaño de granos en términos de dos números que denota el porcentaje aproximado de cada tamaño presente. El método de comparación es más conveniente y bastante preciso en muestras de granos de ejes iguales. El número de tamaño de grano "n" puede obtenerse con la siguiente relación: $N=2^{n-1}$.

b) Método planimétrico

Es el más antiguo procedimiento para medir el tamaño de grano de los metales. El cual consiste en que un círculo de tamaño conocido (generalmente 19.8 mm f, 5000 mm² de área) es extendido sobre una microfotografía o usado como un patán sobre una pantalla de proyección. Se cuenta el número de granos que están completamente dentro del

círculo n_1 y el número de granos que interceptan el círculo n_2 para un conteo exacto los granos deben ser marcados cuando son contados lo que hace lento este método.

c) Método de intercepción

El método de intercepción es más rápido que el método planimétrico debido a que la microfotografía o patrón no requiere marcas para obtener un conteo exacto. El tamaño de grano se estima contando por medio de una pantalla dividida de vidrio, o por fotomicrografía o sobre la propia muestra, el número de granos interceptados por una o más líneas rectas.

Los granos tocados por el extremo de una línea se cuentan solo como medios granos. Las cuentas se hacen por lo menos en tres posiciones distintas para lograr un promedio razonable. La longitud de líneas en milímetro, dividida entre el número promedio de granos interceptados por ella da la longitud de intersección promedio o diámetro de grano. El método de intersección se recomienda especialmente para granos que no sean de ejes iguales.

2.7.2 Equipo utilizado en la investigación para la micro-estructura

Microscopio Óptico – Metalográfico. Perteneciente al laboratorio de metalografía, el mismo realiza el reporte de ensayos de microestructuras. Marca: “Carl Zeiss”. Modelo: Neophot 30. Lentes Planocromáticas HD (3.2x / 0.60 ∞ / -A; 12.5x / 0.25 ∞ / -A); HD 25x / 0.50 ∞ / 0 -A; (50x / 0.90 ∞ / -A); HD HI 100x / 1.30 ∞ / 0 -A; cámara de vídeo Panasonic color CCTV wv – CP 474 (Figura 2.8).



Figura 2.8. Microscopio óptico-Metalográfico.

Especificaciones:

Las probetas deben ser preferentemente cilíndricas de 12 a 15 mm de diámetro con una altura de 10 mm.

Pasos:

1. Seleccionar una superficie para trabajar (la más regular).
2. Se comienza a trabajar con la rectificadora plana. De lo contrario emparejar la superficie en la piedra esmeril (tratar de que las dos superficies estén parejas).
3. Comenzar a trabajar con papel esmeril con el número más bajo (grano más grueso) No. 180, sin rectificadora, después de la rectificadora se utiliza piedra esmeril No. 360.
4. El último papel de lijar es 400 después de este se comienza a pulir con paño y pasta verde. Cuando se lija con el primer papel en una dirección, entonces, la dirección de lijado del próximo papel de mayor número (grano más fino que el anterior), es perpendicular.
5. Se pule hasta que desaparezca el rayado del papel esmeril con paño de fetro y pasta abrasiva GOI (pasta verde) o pasta abrasiva de diamante.
6. Se procede al ataque químico con nital es una solución de 2% de ácido nítrico con alcohol etílico. Se aplica a la superficie pulida esta solución hasta que la superficie se ponga mate (es relativo).
 - Base metálica, si es perlítica.
 - Base metálica y mate, es ferrita perlítica.
 - Se queda brillante cuando la base metálica es ferrítica.

2.8 Conclusiones

En este Capítulo se desarrolló la metodología utilizada en la investigación, que incluye la selección de los factores y niveles, la selección de las variables de respuestas y del diseño experimental, se muestra el diseño de la investigación y el montaje del ensayo, y la caracterización de las probetas, así como la explicación del procedimiento de ensayo. De

esta forma, todo queda dispuesto para que en el siguiente capítulo se exponga el análisis de resultados.

Capítulo 3. UTILIZACIÓN DE RESIDUALES DE LA INDUSTRIA DEL NÍQUEL COMO NODULIZANTE

3.1 Introducción

En el capítulo se presenta el análisis de la composición química de los residuales de la industria del níquel en las empresas de Moa y Nicaro y se determina que la cola idónea es la de ERRL. Además, aparece detallado el desarrollo de los experimentos para determinar la eficiencia de la cola, se describe la Instrucción tecnológica para utilizar la cola de níquel como nodulizante en la producción de piezas de hierro nodular y culmina con un análisis técnico – económico entre la utilización del NODULANT IV y la cola de níquel.

3.2 Análisis de la composición química de los residuales de la Industria del Níquel

Los datos fueron suministrados para su análisis por el Centro de Investigaciones del níquel (CEINNIQ) [Capote, 2011] y aparecen incorporados en la Tabla 3.1 donde se presenta un reporte general de la composición química de las colas de las fábricas “Pedro Soto Alba”, “Ernesto Che Guevara” y “René Ramos Latour”.

Tabla 3.1. Composición química de las colas de Moa y Nicaro (CEINNIQ).

Composición	Colas ECPSA(%)	Colas ERRL (%)	Colas ECECG (%)
Ni	0,06 – 0,14	0,39	0,3 – 0,4
Co	0,008 – 0,01	0,072	0,08
Fe	44 - 48	40,9	43 - 45
Mg	0,05 – 0,1	7,55	3,5 – 4,5
Mn	0,3 – 0,4	0,56	0,5 – 1,5
Al	3 - 4	2,32	4 – 4,5
Cr	1- 2	1,87	2 - 2,5
Ca	2	0,35	0,1
SiO ₂	10,7 – 17,12	19,49	8,56 – 10,7
S	2- 3	0,2	0,3

Condiciones para la selección de la cola más eficiente:

1. La de mayor por ciento de magnesio (Mg) porque será utilizado como el elemento modificador.
2. La de menor por ciento de azufre (S) porque es el elemento des-modificador.

El análisis de la composición química de las colas de las fábricas “Pedro Soto Alba”, “Ernesto Che Guevara” y “René Ramos Latour”, incorporada en la Tabla 3.1 demuestra que la cola de la Empresa René Ramos Latour tecnológicamente es la más apropiada por presentar el mayor por ciento de Mg igual a 7,55 y el menor por ciento de S igual a 0,2.

3.2.1 Selección de la cola

La cola como ligadura compleja, al mismo tiempo contiene Mg, Ca y Si, siendo su costo bajo. El contenido y la acción simultánea de Mg – Ca - Si facilitan la formación del grafito esferoidal, con la disminución de la tendencia a la formación en la micro-estructura de una matriz metálica con carburo de hierro. El coeficiente de asimilación del magnesio alcanza del 40 - 60%, cuando el porcentaje de magnesio se encuentra en el rango de 4 - 8%.

Se conoce que el Mg es el responsable de la esferoidización del grafito y es un poderoso desulfurante y desoxidante, o sea, posee alta afinidad por el azufre y el oxígeno. Si los porcentajes de oxígeno y azufre son altos, entonces se pierde magnesio en forma de MgO y MgS. Se recuerda que el Mg es el centro de nucleación en forma esferoidal.

Para seleccionar la cola se tuvo en cuenta que el Mg es el principal modificador y que los parámetros de mayor eficiencia se encuentran de 4 – 8 %. El mayor rendimiento de la cola a diferentes porcentajes de Mg es de la cola ERRL, que cumple con esta condición al tener un 7,55 % de Mg, presenta un 19,49 % de SiO₂, 0,35% de Ca y solo un 0,2 % de azufre, es decir cumple con los porcentajes recomendados por los principales productores.

3.3 Desarrollo del experimento para determinar la eficiencia de la cola ERRL

Para determinar la efectividad de la utilización de la cola se tomaron cuatro muestras, aumentando 50 gramos en cada una como se muestra en la Tabla 3.2. Para el experimento se mantuvo constante el tamaño de la partícula de cola y se variaron la cantidad de cola y del inoculante [Raiza, 2013].

Tabla 2.3. Corridas del experimento.

No.	Componentes		
	Tamaño de partícula de cola en cazuela (mm)	Cola ERRL (g)	Inoculante FeSi en el molde (mm)
1	22,4	150	0,5; 1,5 y 2,5
2	22,4	200	0,5; 1,5 y 2,5
3	22,4	250	0,5; 1,5 y 2,5
4	22,4	300	0,5; 1,5 y 2,5

3.3.1 Obtención de probetas en el molde

El hierro fue fundido en el horno de cubilote, luego se vertió en la cazuela previamente preparada. El método de modificación utilizado fue el de cazuela abierta "Sandwich". En el fondo de la cazuela se practica un pozo para la colocación de la cola y encima se ubican pequeños trozos de chatarra de acero, en cantidades de 1 a 2 % del peso del caldo a tratar. Esta cubierta retrasa la reacción, reduce la temperatura del caldo unos 24 °C y mejora la recuperación del magnesio.

Se aprovecha el silicio de la cola, de forma que a la vez que ocurre la nodulización, comienza en cierto modo la inoculación.

La mayoría de los inoculantes contienen 45 - 75 % Si, con algo de Ca y Al. La granulometría del inoculante es importante para conseguir la disolución en el caldo, los tamaños más frecuentes van desde 1,6 hasta 10mm y se usan en cucharas de 250 kg (en el molde la granulometría puede ser de 1 - 3 mm), si el tamaño es demasiado grande, puede que no se disuelva bien y si es pequeño se puede oxidar y formar escoria.

La inoculación en el molde se hace colocando finos de inoculante en la taza de vertido, el tragadero o en los escoriadores y obligando a que todo el caldo pase sobre él. Las adiciones hechas en el molde están normalmente entre 0,1 y 0,2 %. Los inoculantes que

no están bien disueltos pueden producir defectos de inclusiones brillantes o lustrosas que pueden reducir la maquinabilidad y las propiedades de fatiga.

3.3.2 Procedimiento para el vertido

Se cargaron las porciones de cola en la cazuela, se realizó el vertido del metal a una temperatura de 1450 °C, paralelamente el molde fue preparado con el inoculante en el sistema de alimentación. El molde es vertido a temperatura de 1400 °C, se produce la solidificación y enfriamiento, luego el desmoldeo y limpieza. Luego de obtenidas, las probetas fueron preparadas para el estudio metalográfico y de resistencia a la tracción. El estudio metalográfico se desarrolló en el Laboratorio de metalografía de la UHO, se utilizó el Microscopio Óptico - Metalográfico.


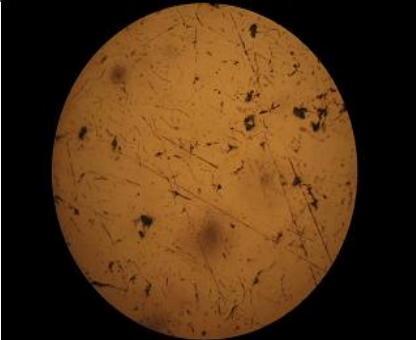
3.4 Presentación de resultados

a) Resultados de la primera corrida experimental (Tabla 2.4)

Cantidad de cola = 150 g

Inoculante FeSi en el molde: 0,5; 1,5 y 2,5 mm

Tabla 2.4. Resultados de la primera corrida experimental.

Probeta	Micro fotografía
	

Se observa una estructura laminar con incipientes nódulos. Además de ser poca cantidad de cola, el tamaño de grano es pequeño y una parte es arrastrada por el flujo de líquido, otra queda flotando en la parte superior del escoriador y solo una pequeña porción reacciona logrando la cristalización de algunos nódulos. Con 2,5 mm solo se disuelve el 80 %, y a pesar de ser mejor, no se logra un gran nivel de esferoidización y la estructura


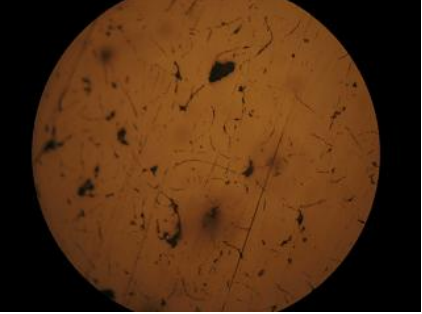
siguió siendo la misma, esto demuestra que la cantidad de 150 g no es la ideal y por eso no se logran los nódulos necesarios. La resistencia a tracción es de 280,5 MPa.

b) Resultados de la segunda corrida experimental (Tabla 2.5)

Cantidad de cola = 200 g

Inoculante FeSi en el molde: 0,5; 1,5 y 2,5 mm

Tabla 2.5. Resultados de la segunda corrida experimental.

Probeta	Micro fotografía
	



Se observa una estructura laminar con la aparición vermicular. Con el valor 0,5 mm y 2,5 mm ocurre lo mismo que en el caso anterior, sin embargo, ya aparece grafito en forma vermicular, esto demuestra que la cantidad de cola, aunque mejoró la forma del grafito, todavía es insuficiente. La resistencia a tracción 350 MPa.

c) Resultados de la tercera corrida experimental (Tabla 2.6)

Cantidad de cola = 250 g

Inoculante FeSi en el molde: 0,5; 1,5 y 2,5 mm

Tabla 2.6. Resultados de la tercera corrida experimental.

Probeta	Micro fotografía
	


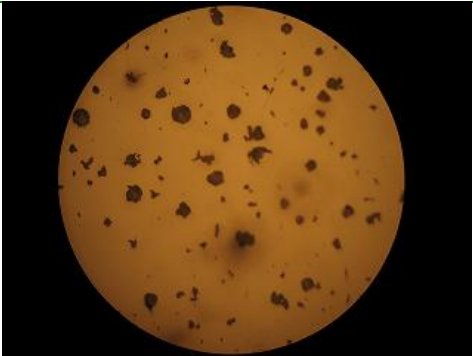
Se observa la aparición de nódulos definidos. Con valores de grano de 1,5 mm, el inoculante se fundió totalmente y aparecen los nódulos definidos, mientras que con 2,5 mm solo se disuelve el 80 %, y no se logra un gran nivel de esferoidización, es decir es inferior cuando se usa el grano 1,5 mm. La resistencia a tracción 480,5 MPa.

d) Resultados de la cuarta corrida experimental (Tabla 2.7)

Cantidad de cola = 300 g

Inoculante FeSi en el molde: 0,5; 1,5 y 2,5 mm

Tabla 2.7. Resultados de la cuarta corrida experimental.

Probeta	Micro fotografía
	

Se observa el aumento de los nódulos bien definidos. Se pone de manifiesto que la cantidad de cola de 300 g combinado con el tamaño de grano de 1,5 mm del inoculante, es la mejor, además, se logra el mayor valor de resistencia a tracción 512,4 MPa.

3.5 Instrucción tecnológica para utilizar la cola de níquel de la ERRL como nodulizante en la producción de piezas de hierro nodular

1. Antes del vertido en los moldes el jefe de brigada de fusión debe conocer: (a) la carga metálica en el horno cubilote debe ser a base de: arrabio, chatarra de acero y retorno de la producción, y (b) la composición química de la aleación a verter ($< 0,03\%$ S), la temperatura de vertido en el molde y tiempo de mantenimiento del metal líquido en el molde hasta el desmoldeo.
2. La cola como nodulizante (300 g) se ubica en el pozo de la cazuela "Sandwich", sobre ella chatarra fina de acero y se realiza el vertido del hierro desde el horno de cubilote.
3. Se prepara el molde con las probetas y se ubica el inoculante a base de silicio dentro del sistema de alimentación (en el escoriador), con una granulometría de 1,5 mm y adiciones entre 0,1 y 0,2 %.
4. Se realiza el vertido en los moldes a temperaturas desde 1365 a 1450 °C, con un flujo líquido continuo en el comienzo hasta llenar el sistema de alimentación y lento al final del vertido, de forma tal que no se derrame el metal del molde.
5. Se procede al desmoldeo y limpieza de las probetas obtenidas.
6. Se preparan las probetas para estudios metalográficos y de propiedades.

3.6 Valoración técnico – económica

Para realizar una valoración económica entre el Nodulant IV y la cola ERRL utilizados como nodulizante en la producción de hierro nodular, tomamos como base comparativa el comportamiento del rendimiento tecnológico general (Rtg), lo cual nos permite hacer medibles la eficacia y la eficiencia por separado de los factores que determinan el costo de la producción, la productividad y competitividad, como son el rendimiento metálico (Rm), índice de rechazo (Ir) y la pérdida metálica (Pm) los cuales se expresan en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8. Comparación del comportamiento de los índices tecnológicos.

No.	Parámetros	Nodulizante		Eficiencia	
		Nodulant IV	ERRL	unidades	(%)
1	Peso de la colada (kg.)	1000	1000	-	-
2	Rendimiento metálico (%)	94,44	94,44	-	-
3	Índice de rechazo (%)	5,0	5,0	-	-
4	Pérdida metálica (%)	5,5	5,5	-	-
5	Rendimiento tecnológico general (%)	84,79	84,79	-	-
6	Productividad (t/h)	1,82	1,82	-	-
7	Costo (\$/t)	1908,31	1900,00	8,31	0,8
8	Precio (\$/t)	2111,03	2100,00	11,03	0,9

En esta tabla se puede apreciar que entre el costo del Nodulant IV y el costo de la cola ERRL hay una diferencia de 8,31 \$/t, generándose una eficiencia de 0,8 %, y entre el precio hay una diferencia de 11,03 \$/t y una eficiencia de 0,9 %, además existe una mejor competitividad por parte de la cola ERRL. Estos resultados no contemplan los gastos por transportación, con los cuales el ahorro utilizando las colas sería mucho mayor ya que la misma es nacional.

3.7 Conclusiones

- Se determinó que la cola de níquel de la “Empresa René Ramos Latour”, es la que presenta mejores características para ser utilizada como nodulizante: 7,55 % Mg, 19,49 % SiO₂ y 0,2 % S.
- La mejor nodulización se obtiene con la cantidad 300 g de cola y una granulometría de 22,4 mm, combinado con la inoculación en el sistema de alimentación y con tamaño 1,5 mm del inoculante, además se logra el mayor valor de resistencia a tracción 512,4 MPa.

- Se estableció una instrucción tecnológica que permite utilizar la cola de níquel de la “Empresa René Ramos Latour” en la obtención de nodulizante para la producción de hierro nodular de forma eficiente.
- El uso de la cola permite reducir los precios en 11,03 \$/t, generándose una eficiencia de 0,9 %, respecto al uso del Nodulant IV de importación.

CONCLUSIONES GENERALES

- Se demostró que es posible la utilización de la cola de níquel de la “Empresa René Ramos Latour” como nodulizante (7,55 % Mg, 19,49 % SiO₂ y 0,2 % S). La mejor nodulización se obtiene con la cantidad 300 g de cola y una granulometría de 22,4 mm, combinado con la inoculación en el sistema de alimentación y con tamaño 1,5 mm del inoculante además se logra el mayor valor de resistencia a la tracción 512,4 MPa.
- Se definió la efectividad del FeSi 45 como inoculante en el sistema de alimentación, lo cual permite su utilización permanente, ya que existe en grandes cantidades en la empresa y el país.
- Se estableció una instrucción tecnológica que permite utilizar la cola de níquel de la “Empresa René Ramos Latour” como nodulizante para la producción de hierro nodular de forma eficiente.
- El uso de la cola permite reducir los precios en 11,03 \$/t, generándose una eficiencia de 0,9 %, respecto al uso del Nodulant IV de importación.

RECOMENDACIONES

- Continuar el estudio con otros inoculantes y otros métodos de inoculación como: en la cazuela y directamente en la cámara de reacción “Método In - Mold”.
- Trabajar en la mejora continua de la investigación y experimentar con otros métodos como: In - Mold y el vertido dinámico.
- Lograr la introducción de los resultados en la industria.

BIBLIOGRAFÍA

- [Abramov, 1983] Abramov. A. "Manual del joven fundidor". Editorial Alta Escuela. Moscú. 1983. 203 p.
- [Alexandor, 1998] Alexandor, N. H. Control del estado del metal líquido para la obtención de hierro con grafito esferoidal. Liteinoe Proistbostba. N. 3. 1998.
- [Batista^a, 1999] Batista Cabrera, A. "Utilización del magnesio como desulfurante y su influencia en las propiedades del HGE obtenida por el método "In-Mold". Mundo Mecánico. N. 2. 1999.
- [Batista^b, 1999] Batista Cabrera, A. "Utilización del magnesio como desulfurante y su influencia en las propiedades del HGE obtenida por el método "In-Mold". Mundo Mecánico. N. 2. 1999
- [Batista^c, 1999] Batista Cabrera, A. "Influencia del azufre en el rendimiento de las piezas de hierro nodular obtenida por el método "In- Mold". Mundo Mecánico N. 6. 2000.
- [Batista^a, 2003] Batista Cabrera, A; Ordóñez, U. "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. 2003.
- [Batista^b, 2003] Batista Cabrera, A.; Ordóñez, U. "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. 2003.
- [Bernart, G., 2013] Bernart, G., Procesos de fundición con modificadores. Disponible en: <http://www.lince-fundición.com>, [Consulta: 24.03.2013]
- [Broks, 2013] Broks, W., Método del convertidor. Disponible en: <http://www.cta.org.com/foro> [Consulta: 20.02.2013]
- [Capote, 2011] Capote Flores, Neicis; Silvia M. Ariza Borges; Carmen Hernández Fernández; Javier Breffe Consuegra. Panorama y estado actual de la biolixiviación de minerales oxidados para la extracción de níquel y cobalto. Centro de Investigaciones del Níquel (CEINNIQ), ISMM "Dr. Antonio Núñez Jiménez". 2011.
- [Davis, 1990] Davis, K. G. Dissolution of MgFeSi Alloy During Indmold
-

Treatment. *British Foundryman*. N. 457. 1990.

[Dunks, 1976] Dunks, C.M. "Mold Nodulizing and Continuous Stream Treatment Techniques as Operated in Europe". *Foundry Trade Journal*. 1976. N. 234.

[Genderevich, 1999] Genderevich, N. A. "Elección del modificador para la obtención de piezas de hierro de alta resistencia modificado en el molde". *Liteinoe Proistbostba*. N. 2. 1999.

[CoCQ, 2013] Proceso CoCQ, disponible en:
<http://www.carpenterfortuna.com.mx>
 [Consulta: 12.02.2013]

[Ildaruya,2012] ILARDUYA. Nodulizantes. Disponible en:
<http://www.ildaruya.com/aditivos.htm> [Consulta: 09/12/12]

[Iron Casting, 2013] Iron Casting whith Spheroidal or Nodular Graphite Specification. Disponible en: www.clickafoundry.com. [Consulta: 14.01.2013]

[Karsay, 1992] Karsay, S. Producción de hierro nodular, 2da Edición. Edit. Titanic Inc. Comp. 1992.

[Lince, 2013] LINCE FUNDICION. Base de Datos en Línea, 2013. Disponible en: <http://www.lince-fundición.com> [Consulta: 14/03/13]

[Luffe, 1994] Luffe, A. "Modificación del hierro con grafito esferoidal en el molde". *Liteinoe Proistbostba*. N. 12. 1994. (en ruso).

[Navas, 2000] Navas M., E. Apuntes de fundición. Curso de Postgrado en fundición de metales. Facultad de Ingeniería, Universidad de Holguín, 2000.

[Peter E., 2013] Colaborado por Peter E. para arquitectura y construcción ARQHYS. Disponible en:
<http://www.arqhys.com/contenidos/hierro-produccion.html>
 [Consulta: 09/12/13]

[Raiza, 2013] González Q., R.; Sánchez F., R.P.; Navas M., E.; Pérez R., R., Influencia del por ciento de pureza de la cola en la composición química del hierro nodular, CD-ROM, VI Conferencia Científica Internacional de la Universidad de Holguín, 2013.

[Saavedra, 2013]^a Saavedra, Alexander y M. Alexander E. Viloría. Fundición Esferoidal. Disponible en:

<http://www.buenastareas.com/ensayos/FundicionEsferoidal/130382.html>. inf:info@alexandersaavedra.com [Consulta: 09/03/13]

[Saavedra, 2013]^b Saavedra, Alexander y M. Alexander E. Vilorio. Fundición Esferoidal. Disponible en:
<http://www.angelfire.com/al3/mambuscay/Art3.htm> (13/5/2011) 21:51pm inf:info@alexandersaavedra.com [Consulta: 09/03/13]

[Sánchez, 2002] Sánchez F., R.P., Perfil de la Fundición de Acero-Hierro de Holguín. Convención Internacional de la Industria Metalmeccánica METANICA. CD-ISSN 1607-6261. 2002

[Sánchez^a,2007] Sánchez Figueredo, Rigoberto Pastor. “Tecnología para obtención de fundidos con grafito esferoidal por el método “In Mold” asistida por computadora”. Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en Diseño y Fabricación Asistido por Computadoras. Holguín, 2007.

[Sánchez^b, 2007] Sánchez F., R.P., El rendimiento tecnológico general como regulador del costo de las piezas fundidas de hierro nodular. Resumen III Conferencia Internacional. Ingeniería. 2007

[Sánchez^c, 2007] Sánchez F., R.P., 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. 2007

[Sánchez, 2007]^d Sánchez F., R.P., Horno Multipropósito. Convención Internacional de la Industria Metalmeccánica. METANICA. CD-ISSN 1607-6261. 2007

[Sánchez^e, 2007] Sánchez F., R.P., Sistema de trabajo 20 X 10. Convención Internacional de la Industria Metalmeccánica. METANICA. CD-ISSN 1607-6261.2007

[Sánchez, 2008] Sánchez F., R.P., Entorno tecnológico alternativo para la producción competitiva, sostenible y sustentable de fundidos de cuproaleaciones densos. Jornada Científica. Facing – CEDEMA. 2008

[Sánchez^a, 2009] Sánchez F., R.P., Tecnología para la manufactura competitiva de fundidos de aleaciones de cobre. IV Conferencia Científica CD – ROOM-ISSN – 978-959-16-1010-2. 2009

[Sánchez^b, 2009] Sánchez F., R.P., Cálculo competitivo del costo y precio de los fundidos de bronce y latones. IV Conferencia Científica CD – ROOM-ISSN – 978-959-16-1010-2. 2009

-
- [Sánchez, 2010] Sánchez F., R.P., Ahorro de portadores energéticos en la obtención de fundidos no ferrosos bajo las condiciones específicas de la industria metalúrgica cubana._Memorias del 6. Taller Internacional de Energía y Medio Ambiente CD – ROOM-ISBN: 978- 959- 257- 231- 7. 2010
- [Suárez, 2013] Suárez Lisca. Ing. Lázaro Humberto. Producción de hierro fundido con el grafito esferoidal en las condiciones de un taller de fundición pequeño. Disponible en:
<http://www.monografias.com/trabajos20/hierro-nodular/hierro-nodular.shtml> [Consulta: 09/02/13]
- [Tartera, 2012] Tartera. J. Joining and Fabrication of Nodular Iron Casting by welding. Base de Datos en Línea, 2004.Disponible en:
<http://www.implog.com/foundry/books.htm> [Consulta: 24/11/12]
-