



UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN
OSCAR LUCERO MOYA

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**UTILIZACIÓN DE LA COLA DE LA EMPRESA RENÉ RAMOS LATOUR EN
LA OBTENCIÓN DE NODULIZANTE PARA PRODUCIR HIERRO DE ALTA
RESISTENCIA**

Tesis presentada en opción al Título de Ingeniero Mecánico

KAREL MONTEJO RODRÍGUEZ

HOLGUÍN

2011



UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN
OSCAR LUCERO MOYA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**UTILIZACIÓN DE LA COLA DE LA EMPRESA RENÉ RAMOS LATOUR EN
LA OBTENCIÓN DE NODULIZANTE PARA LA PRODUCCIÓN DE HIERRO
DE ALTA RESISTENCIA**

Tesis presentada en opción al Título de Ingeniero Mecánico

Autor: KAREL MONTEJO RODRÍGUEZ

Tutor: MSc. RIGOBERTO PASTOR SÁNCHEZ FIGUEREDO

Oponentes: Ing. ALEXIS RONDA ORO

Esp.Ing. RAÚL REYES CAMARENO

HOLGUÍN

2011

AGRADECIMIENTO

Agradezco este trabajo a mi tutor, por su dedicación, paciencia y desinterés durante todo este tiempo, a la colaboración prestada por la Empresa de Fundiciones Acero-Hierro de Holguín, en especial al Ing. Alexis Ronda Oro, a Frank, a Meinardo, Víctor Manuel, a mi hermana Alianna quién en todo momento estuvo en disposición de ayudarme, a mi mamá, a mi papá, a mi prima Eliannis, y a todos los que de una forma u otra tuvieron que ver con este trabajo y en mi formación como Ingeniero Mecánico.

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mi mamá, a mi papá, a mi hermana y a mi prima, quienes fueron mis guías durante mi formación como profesional.

ABREVIATURAS

EFAH Empresa de Fundición Acero - Hierro

MINAZ Ministerio de la Industria Azucarera

MINTUR Ministerio del Turismo

MINBAS Ministerio de la Industria Básica

ERRL Empresa René Ramos Latour

ECPSA Empresa Pedro Soto Alba

ECECG Empresa Ernesto Che Guevara

UHO Universidad de Holguín

RESUMEN

Esta investigación da solución a unas de las tareas del banco de problemas de la Empresa de Fundiciones Acero – Hierro de Holguín, dada la necesidad de producción de nodulizante en las condiciones actuales. El objetivo general se cumple con la aplicación de una tecnología en un horno de 500 mm de diámetro interior, para el cual se desarrolló el cálculo de los parámetros tecnológicos y prueba experimental. La investigación logra la obtención de nodulizante con productos resultantes de la industria del níquel de forma competitiva. Se describen características de los nodulizantes e inoculantes de en la producción de hierro nodular, se hace una descripción de las diferentes materias primas y materiales que se utilizan para producir hierro dúctil nodular. También se abordan las características de los diferentes hornos eléctricos que se utilizan con este objetivo. Se realiza un análisis de las colas de las industrias niquelíferas de Moa y Nicaro, conjuntamente se expone en detalles la metodología a seguir para la obtención de nodulizante, además se efectúan valoraciones técnicos – económicas, medio ambientales y para le defensa. A partir de la tecnología efectuada se brindan conclusiones y recomendaciones que permiten mejorar la calidad de la producción en la EFAH.

ABSTRACT

This investigation offers solution to one of the tasks from the bank of problems of the Steel – Iron Foundries Enterprise from Holguín, related to the need of saving energy payees in the production of nodulizing under its specific conditions. The main objective accomplishes with the application of a technology to an oven with a 500 mm interior diameter, for which the calculation of the technological parameters and the experimental test were developed. The investigation achieves the decrease of the energy payees consumption in the nodulizing production with products obtained from the niquel industry in a competitive and sustainable way. The characteristics of the nodular iron production are presented, as well as the ones of the nodulizing and inoculante. A description of the different prime materials used for the production of the nodular ductile iron is made. It also talks about the different types of electric ovens that exist. An analysis of the nickel industrie lines from Moa and Nicaro is made. Simultaneously, the methodology to be followed for the obtaining of nodulizing is exposed with details. Some technical-economical, environmental and for the defence valuations are given as well. Starting from the carried out analysis, conclusions and recommendations that respond to the existent problem in the EFAH are offered.

INDICE

Denominación	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. CARACTERÍSTICAS Y ANTECEDENTES DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE NODULIZANTE	7
1.1. Introducción.	8
1.2. Aditivos de fusión.	9
1.2.1. Características de los nodulizantes.	9
1.2.1.1. Composición química de la aleación nodulizante.	11
1.2.1.2. Cantidad de aleación nodulizante.	11
1.2.1.3. Porcentaje de magnesio residual deseado.	12
1.2.1.4. Introducción del magnesio en la cazuela	12
1.2.2. Características de los inoculantes.	13
1.3. Procedimientos de tratamientos de nodulizantes.	15
1.4. Características de la fundición de hierro nodular.	17
1.4.1. Materias primas para la producción de hierro dúctil nodular.	17
1.5. Características de los hornos de fundición eléctricos.	28
1.5.1. Horno de inducción eléctrica.	29
1.5.2. Horno de arco eléctrico directo.	29
1.5.3. Horno de arco eléctrico indirecto.	31
1.5.4. Horno eléctrico y cuchara.	32
1.6. Composición química de los elementos de la industria del níquel.	33
1.7. Conclusiones parciales.	36
2. METODOLOGÍA TECNOLÓGICA PARA LA OBTENCIÓN DE NODULIZANTE CON PRODUCTOS RESULTANTES DE LA DE LA INDUSTRIA DEL NÍQUEL.	37
2.1. Análisis de la composición química de los residuales de la industria del níquel.	38
2.2. Cálculo de los parámetros tecnológicos del horno discontinuo de cuba alta de 500 mm de diámetro interior.	40
2.2.1. Características del Horno de cubilote Propuesto. Alta de 500 mm de diámetro interior.	40
2.3. Selección de la cola.	46
2.3.1. Desarrollo empírico del experimento para determinar la eficiencia de la cola ERRL.	46

2.4. Instrucción tecnológica de producción de nodulizante.	52
2.5. Valoración técnico - económica.	59
2.7. Valoración medio ambiental.	60
2.8. Valoración para la defensa de la patria.	61
CONCLUSIONES	62
RECOMENDACIONES	63
BIBLIOGRAFÍA	64

INTRODUCCIÓN

La fundición es un antiguo arte de producción de piezas metálicas a través del vertido de un metal o una aleación fundida sobre un molde hueco, por lo general hecho de arena. Es de vital importancia para el progreso de un país, el desarrollo de la construcción de maquinarias. Dentro de esta rama de la industria, la producción de artículos metálicos ocupa un lugar predominante. Las aleaciones ferrosas son hoy en día un punto clave para el desarrollo de la industria de la construcción, la fabricación de piezas para maquinarias agrícolas, la industria automovilística, la industria naval, la industria azucarera, etc. [Sánchez^a, 2007]

En Cuba a pesar de haberse logrado cierto desarrollo en la industria mecánica y metalúrgica, el estado actual del sistema económico del país no facilita la introducción de los logros de la ciencia y la técnica, entre otras razones, por la no disponibilidad de recursos financieros.

La Empresa de Fundiciones de Acero - Hierro de Holguín (EFAH), es una de las entidades que presenta en su banco de problemas la producción de nodulizantes para obtener hierro nodular, la misma está ubicada en la carretera de San Germán Km 3 ½, Holguín, fue fundada en julio de 1980 y redimensionada en el año 2003 y consta de dos talleres fundamentales para su producción. [Sánchez, 2002]

El taller de producciones ferrosas 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. El moldeo se realiza en cajas metálicas de dimensiones 1000 x 800 x 300 mm y 630 x 500 x 25 mm y se utilizan mezclas en verde. 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. [Sánchez, 2002]

El contenido de azufre en el metal base, a partir del año 1998 ha aumentado de 0.03% hasta 0.067% según datos del 2011. El carbono equivalente es bajo, no sobrepasa el 4%. Posee un taller secundario para la elaboración y secado

de los machos, estos son elaborados con mezclas de cromita, bentonita, fuel oil y melaza con secados en estufas a temperaturas de 200 – 250° C. Presenta un sistema de moldeo mecanizado con máquinas neumáticas movidas por un compresor que impulsa de forma estable aire comprimido a seis atmósferas. [Sánchez^a, 2007]

El taller de fundiciones no ferrosa en su entorno tecnológico cuenta con: horno de crisol para la fusión de bronce, horno tambor para la fusión de aleaciones de aluminio y se moldea con pisones neumáticos y mezclas en verde. La empresa tiene un taller auxiliar de herramental para la construcción de los modelos, accesorios, dispositivos y mantenimiento necesario para la ejecución de la producción. [Sánchez, 2002]

El azufre es el principal desmodificador en la obtención de aleaciones de hierro con grafito nodular. Actualmente, en nuestro país la compra de arrabio para fundición se hace prácticamente imposible, por lo tanto se ha realizado una adecuación de las condiciones de producción, donde el material base para la fusión en los hierros fundidos lo constituye la chatarra de hierro procedente principalmente del Ministerio de la Industria Azucarera donde las fundiciones se realizan en hornos de cubilote, lo que trae como consecuencia que el contenido de azufre en la misma es relativamente alto. [Sánchez^a, 2007]

La producción del hierro con el grafito nodular se comienza a usar alrededor de los años 50, 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 el hierro gris. En Cuba son pocos los talleres de fundición que son capaces de aplicar esta tecnología, sin embargo en talleres de fundición pequeños pero con equipamiento requerido pensamos que fuese posible desarrollar esta tecnología con vistas a permitir una mayor diversidad en la producción de dichos talleres de fundición. [Suárez, 2004]

Para la obtención del hierro nodular se necesita el nodulizante dentro de los cuales podemos encontrar varios como son el magnesio, el cerio y 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 las fábricas KTP “60 Aniversario Revolución de Octubre” y 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**, la necesidad de obtener nodulizante de una manera competitiva, en las condiciones actuales de la Empresa de Fundiciones Acero – Hierro.

Por ese motivo surge como **objeto de estudio**, las materias primas y materiales que intervienen en la obtención de nodulizante y como **campo de acción** la utilización de las colas de Níquel en la obtención de nodulizante.

La investigación plantea como **hipótesis** que, utilizando las colas residuales de la industria del níquel se puede obtener nodulizante de una manera competitiva bajo las condiciones actuales de la Empresa de Fundiciones Acero – Hierro.

A partir de la hipótesis, se plantea como **objetivo general** del trabajo, utilizar la cola de la Empresa René Ramos Latour en la obtención de nodulizante para la producción de hierro de alta resistencia.

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

- Evaluar los procedimientos existentes para la producción de nodulizante.
- Elaborar una instrucción tecnológica que permitan la producción de nodulizante con productos residuales de la industria del níquel en las condiciones cubanas.

Tareas de la investigación:

1. Revisión bibliográfica, análisis de la documentación tecnológica de la EFAH y consulta con expertos.
2. Analizar la composición química y mineralógica de las colas de las empresas niquelíferas de Moa y Nicaro.
3. Determinar el porcentaje tecnológico necesario de cola ERRL para realizar la nodulización, que responda a las normas internacionales que rigen esta producción en el mundo.
4. Establecer una instrucción tecnológica que garantice la aplicación de la tecnología alternativa, de manera confiable, estable y eficiente.
5. Escribir el informe.

Los **beneficios esperados** de la investigación se expresan en utilizar la cola ERRL en la obtención de nodulizante de una forma competitiva, más sostenible y sustentable.

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

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

- Método histórico-lógico: Este se aplica para establecer el estado del arte del tema de investigación, como marco teórico referencial, permitiendo conocer que se ha investigado sobre 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 ERRL en la obtención de nodulizante.
- Método de análisis y síntesis: Se utiliza para identificar los factores principales y sus características, que influyen en el fenómeno que se estudia, así como su interrelación. Se aplica para identificar las etapas que intervienen en la utilización de la cola ERRL en la obtención de nodulizante.
- Método de modelación: Se crea un modelo científico como instrumento de la investigación de carácter material o teórico, el cual se utiliza para hacer una reproducción simplificada de la realidad; este cumple una

función heurística, ya que permite descubrir y estudiar nuevas relaciones y cualidades del objeto de estudio. Se aplica al modelar el proceso de desarrollo de las tecnologías que permita la obtención de nodulizante.

- Método computacional: Se utiliza durante la concepción y desarrollo de la aplicación informática para asistir en el cálculo de los parámetros que intervienen en la utilización de la cola ERRL en la obtención de nodulizante.

La investigación identifica como aporte:

- La alternativa de obtención de nodulizante a partir de la cola de la ERRL, bajo las condiciones específicas de la industria metalúrgica cubana de una manera competitiva.

Como **novedad**, la investigación logra por primera vez, la obtención de nodulizante utilizando como materias primas la cola Empresa “René Ramos Latour”.

El informe del trabajo se estructura en la siguiente forma:

Introducción.

Capítulo 1. CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE NODULIZANTE.

En este capítulo se realiza un estudio de los diferentes nodulizantes existentes y su aplicación en la producción de hierro nodular y sus características. Se acomete sobre las materias primas que se utilizan para producir hierro nodular, así como los diferentes hornos eléctricos que se utilizan para la obtención de nodulizantes.

Capítulo 2. OBTENCIÓN DE NODULIZANTE CON PRODUCTOS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA DEL NÍQUEL.

En este capítulo se expone en detalles todos los elementos necesarios para la elaboración de una instrucción tecnológica en la obtención de nodulizante con productos residuales de la industria del níquel.

Se realiza una valoración socio económico, con un análisis del costo y el tiempo de producción de nodulizante, el impacto medioambiental y la aplicación en la defensa.

Conclusiones.

Recomendaciones.

Bibliografía.

Anexos.

1. CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE NODULIZANTE

1. CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE NODULIZANTE

1.1 Introducción

La forma redondeada del grafito nodular reduce la concentración de la tensión y, en consecuencia, el material es mucho más dúctil que el hierro gris. El hierro nodular se suele utilizar en piezas de bombas que sufren elevadas cargas.

El hierro nodular contiene alrededor del 0,03-0,05% en peso de magnesio. El magnesio provoca que las escamas se hagan globulares de tal forma que el grafito se disperse por una matriz de ferrita o perlita en forma de esferas o nódulos. Los nódulos de grafito no son afilados. La forma redondeada del grafito nodular reduce la concentración de la tensión y, en consecuencia, el material es mucho más dúctil que el hierro gris. El hierro nodular normalmente se utiliza para piezas de bombas que requieren alta resistencia (aplicaciones de alta presión o alta temperatura). [Karsay, 1992]

La fundición nodular, dúctil o esferoidal se produce en hornos 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 por que 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 hipoeutécticas 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 y herramientas excepto en rectificadoras.

1.2 Aditivos de fusión

- Nodulizantes
- Inoculantes

1.2.1 Características de los Nodulizantes

Los nodulizantes 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 construidos en las empresas de fundición de acuerdo a los minerales que posean, con características similares en su composición. [ILARDUYA, 2010]

ILARDUYA dispone de una amplia gama de nodulizantes con diferentes granulometrías y diferentes contenidos en Magnesio, Calcio y Tierras raras. Actualmente también ofrece la posibilidad de la nodulización mediante hilo "Cored Wire", lo cual permite una adición más exacta y un mayor rendimiento en el tratamiento. [ILARDUYA, 2010]

En la mayoría de las fundiciones, existe el eterno debate sobre la elección del nodulizante adecuado para su particular proceso de nodulización. Para hacer este debate algo más simple, seguidamente indicamos algunas pautas generales para la correcta elección del Fe Si Mg. [ILARDUYA, 2010]

1.2.1.1 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 [Batista^c, 2003] 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. Por su parte, si la relación Si/Mg es menor de cinco, significa que existirá una reacción excesiva debido a la alta concentración de magnesio; en este último caso no se requiere de grandes áreas superficiales de las cámaras de reacción. [Sánchez^a, 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.

1.2.1.2 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.

1.2.1.3 Porcentaje de magnesio residual deseado

Según Alexander [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, 2002; Sánchez^a, 2007]

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

Según LINCE [2004] cuando el contenido de magnesio residual en la fundición es excesivo, lo cual no es recomendable, en la micro estructura pueden aparecer racimos de hojuelas de grafito 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]

1.2.1.4 Introducción del magnesio en la cazuela

Según Suárez [2004], 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 siguiente figura.

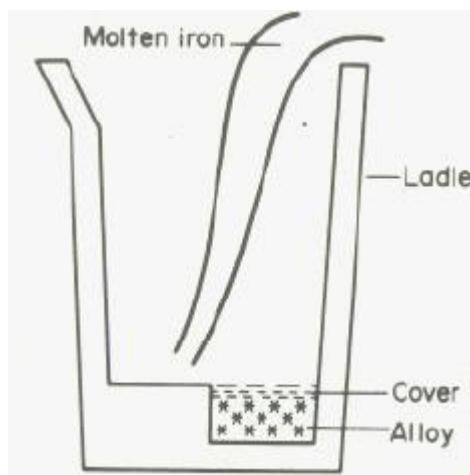


Figura 2. Introducción del magnesio en la cazuela por el método sándwich.

Según las recomendaciones el tiempo de reacción debe estar entre 90 y 150 seg, además la cazuela debe tener una altura superior a dos veces el diámetro. 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.

1.2.2 Características de los Inoculantes

La inoculación 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 nodular en el caso de la fundición nodular. 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, 2010]

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 ferrosilicio que contienen elementos como por ejemplo el Calcio, Bario, Circonio, Aluminio y Estroncio cuyos efectos son:

Aluminio: Normalmente presente en el ferrosilicio y con bajo efecto de inoculación que debe ser limitado al 1,5% para evitar defectos de pinholes en el caso de piezas moldeadas mediante el proceso de moldeo en verde.

Bario: Los inoculantes que contienen Bario son interesantes para tiempos largos de desvanecimiento o de solidificación como es el caso de piezas con grandes secciones. Contenidos de Bario por encima del 3% son innecesarios y pueden provocar generación de escoria.

Calcio: Elemento de potencia de inoculación media a menudo adicionado en combinación con otros elementos como el Aluminio y el Bario. Particularmente interesante para fundición gris con cantidades bajas de azufre (0.03 0.05%) y fundición esferoidal con secciones de tamaño medio.

Estroncio: Los Inoculantes con alrededor del 1% de estroncio son muy efectivos para la fundición gris con medio y alto contenido de azufre y piezas de espesor pequeño. En el caso de la fundición esferoidal los resultados su utilización deberá limitarse a contenidos menores del 1% de Tierras raras en los nodulizantes.

Circonio: Los inoculantes con circonio tienen muy buenas propiedades de inoculación y resistencia al desvanecimiento. Son también muy interesantes como neutralizadores de nitrógeno en piezas con presencia importante de machos. [ILARDUYA, 2010]

Tipos de Inoculantes

FERROSILICIO

75% Std. Granular

75% Std. Piedra

Alta Pureza

Fino

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



Figura 3. Inoculantes.

1.3 Procedimientos de Tratamientos de Nodulizantes

Según Saavedra y Vilorio [Saavedra, Vilorio, 2010]^b los elementos nodulizantes son el Magnesio y en menor proporción el calcio; el Magnesio (más utilizado) tiene un punto de fusión de 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, por lo que 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 siguientes:

Tabla 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

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.

1. 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 peligroso y requiere 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, con lo que se logra 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 de presión, la elevada presión se consigue por evaporación de Magnesio, por este motivo, la cuchara adopta una forma especial, y el espacio libre de la parte superior del baño es relativamente pequeño.

2. Métodos de tratamiento de la fundición con aleaciones de escasa densidad

Se trata de aleaciones de Silicio o ferrosilicio 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, proviniendo 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 ó de grafito. La campana esta 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 técnicas diferentes. La primera 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 Sándwich, la aleación se deposita en una cavidad en el fondo de la cuchara y se tapa con chapas de acero. Al ser llenada la cuchara por la parte superior del fondo se va cubriendo la aleación con fundición líquida. Un 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 0.3-0.7mm. 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.

3. Método de la fundición con aleaciones pesadas

Las aleaciones pesadas en base de Níquel o de Cobre presentan la ventaja de un empleo más sencillo que las aleaciones de baja densidad, pero tienen como principal inconveniente su bajo costo. 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.

1.4 Características del Proceso de Fundición de Hierro Nodular

El proceso fue patentado por La International Nickel Company en el año de 1949 cuando se le otorgo la licencia. Ha tenido un crecimiento bueno en Japón y Alemania, pero sobretodo en Francia donde la producción se emplea para fabricar tubos centrifugados, en tanto que en Estados Unidos su empleo se orienta a la industria automovilística. Para conseguir la cristalización del grafito en forma nodular la fundición líquida debe ser sometida a dos tratamientos consecutivos: 1. Tratamiento de nodulización. 2. Tratamiento de inoculación. El primero consiste en añadir a la fundición líquida una aleación o producto que contenga un elemento nodulizante. Que por cierto son bastante limitados y entre ellos se encuentran los siguientes: Magnesio, Calcio, Titanio, Cromo y Azufre, pero en la industria solo el Magnesio y el Calcio son tenidos en cuenta, y estos elementos son acompañados por otros que sirven como portadores conformando la aleación deseada. En cuanto al segundo proceso (inoculación) consiste en someter la fundición nodulizada a un tratamiento especial con el fin de evitar que pase parcial o totalmente a fundición blanca e impedir que los nódulos se disuelvan en el baño metálico fundido desvaneciéndose la acción nodulizante del Magnesio. Este proceso se realiza cada vez que el metal sale del horno en el chorro o en la cuchara, los inoculantes más empleados son: ferrosilicio (FeSi), el FeSiCr, el silicato de calcio, etc. [Saavedra, Vitoria, 2010]^a

1.4.1 Materias Primas Para La Producción de Hierro Dúctil Nodular

La forma nodular del grafito que caracteriza al hierro dúctil es producida usualmente con un contenido de magnesio de aproximadamente de 0.04 a 0.06 %. El magnesio es un elemento altamente reactivo a la temperatura del hierro fundido, combinándose fácilmente con oxígeno y azufre. Para economizar magnesio y por la limpieza del metal, el contenido de azufre del hierro a ser tratado debe ser bajo (preferiblemente < 0.02%), esto se logra fácilmente en un horno eléctrico por fundición de cargas basadas en chatarra de acero a hierro

en lingotes de calidad especial para la producción del hierro dúctil, junto con chatarra de hierro dúctil. El bajo contenido de azufre puede obtenerse también por fundición en una cúpula básica, ya que el ácido del hierro fundido de la cúpula tiene un alto contenido de azufre y normalmente necesita ser desulfurado antes del tratamiento por desulfurización continua o en serie en un cucharón o recipiente especial. El tratamiento en cúpula ácida del hierro fundido sin la desulfurización previa no es recomendable, porque el hierro consume más magnesio y produce excesiva escoria de sulfuro de magnesio, que es difícil de remover por completo. Para producir hierro dúctil con la mejor combinación de resistencia, alta ductilidad y dureza, las materias primas que deben elegirse serán aquellas con bajo contenido de elementos indeseables, particularmente aquellos que promueven una matriz de estructura perlítica. Un bajo contenido de magnesio es también necesario para conseguir ductilidad del material colado y para facilitar el éxito de los tratamientos térmicos para producir una estructura ferrítica. Para este propósito es necesario usar chatarra de acero de calidad especial o hierro en lingotes, también de calidades especiales. Las calidades de alta resistencia de hierro dúctil pueden ser hechas de chatarra de acero estructural, hierro en lingotes y retornos de fundición, pero determinados elementos, tales como, plomo, antimonio y titanio, son mantenidos siempre lo más bajo posible para lograr una buena estructura de grafito. Esos efectos indeseables, sin embargo, deben ser compensados con la adición de una pequeña cantidad de cerio que da un contenido residual de cerio de 0.003 a 0.01%. Un importante control de las materias primas implica la exclusión del aluminio que puede promover fragilizaciones y defectos superficiales. [Peter E, 2010]

PRINCIPALES ELEMENTOS CONSTITUYENTES DE LA FUNDICIÓN NODULAR:

Dentro de los factores más importantes a tener en cuenta en una eficiente nodulización podemos considerar como el más importante la composición del baño a inocular el cual debe reunir requisitos muy estrictos en lo que concierne al contenido de azufre y elementos trazas, tales como, Bi, Sb, As, etc., que son perjudiciales en la nodulización. [Saavedra, Vilorio, 2010]^b

Según Saavedra y Vilorio [Saavedra, Vilorio, 2010]^b dentro de los principales elementos se encuentran los siguientes:

Carbono

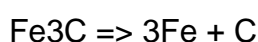
El contenido de carbono para hierro nodular varia entre 3 y 4.3%. Siendo el carbono la base para la formación de esferoides de grafito, a mayor cantidad de carbono corresponderá la formación de un mayor número de esferoides, aunque no debe sobrepasar ciertos límites por encima de los cuales se puede presentar la flotación del carbono. Este fenómeno se presenta debido a que la densidad del grafito es menor que la del hierro, lo que hace que los nódulos floten segregándose en la parte superior de la pieza.

Azufre

Es necesario que antes de efectuar el tratamiento con nodulizantes, bajar el contenido de Azufre al orden del 0.02%. Cuando se adiciona Mg a un baño alto en Azufre se producen formas de grafito interdendrítico y laminas en rosetas. La necesidad primordial de reducir el Azufre a porcentajes tan bajos radica en la gran afinidad entre elemento y el Mg, dado que este último se utiliza como nodulizante para formar sulfuros estables, (MgS). Si el contenido de Azufre es muy alto durante la inoculación gran parte del Mg irá a la escoria en forma de sulfuro. El S ejerce un efecto antinodulizante cuando supera cierto límite en composición; ya que el Azufre y el Oxígeno disueltos en el hierro inhiben la nucleación. Se puede afirmar, además, que el Azufre previene la formación de carburos, debido principalmente a la estrecha relación entre C y S, evitando la formación de Fe₃C.

Silicio

El rango normal del silicio en el hierro nodular oscila entre 1.3 y 3.0%. Debido a que el silicio afecta al carbono equivalente, también afecta el número de esferoides y la flotación del grafito, el incremento del porcentaje de silicio desplaza en eutéctico hacia la izquierda. Cuando se enfría una aleación hipoeutéctica fundida, se precipitan dendritas de austenita hasta que se llega a la temperatura eutéctica, el líquido restante puede solidificar como eutéctico metaestable de austenita y cementita, o como un eutéctico estable de austenita y grafito. Un Silicio alto trae consigo la formación directa del grafito del producto estable. El Silicio también trae consigo, en el hierro solidificado, la descomposición de cementita sólida de acuerdo a la reacción:



Ya sea durante la solidificación normal en el molde o por medio de un tratamiento térmico posterior. Esto puede aplicarse tanto a carburos perlíticos o eutectoides como a carburos eutécticos. En la producción de hierro nodular es indispensable la inoculación que sigue al tratamiento con Mg pero se ha podido observar una excelente grafitización sin necesidad de inocular si se emplea una aleación de Mgferrosilicio, siempre y cuando el tiempo transcurrido entre el tratamiento y la colada en el molde no se prolongue demasiado, pues con el tiempo se redisuelven los nódulos en el baño, desvaneciéndose la acción nodulizante del Mg. En los casos en que el volumen del metal fundido es considerable se hace la adición de ferrosilicio, con el fin de provocar la vida del nódulo; cada vez que el metal se pase de una cuchara a otra se realiza esta misma acción agregándole al chorro o en el fondo de la cuchara.

Manganeso

Este es un elemento antigrafitizante, el contenido de este en el hierro nodular es de 0.3 a 0.5%, a menos que se desee obtener una matriz completamente ferrítica, en cuyo caso este elemento debe utilizarse a muy bajo nivel. Cuando se desea una matriz perlítica, este elemento puede estar en cantidades que excedan el límite superior. Se debe anotar el hecho de que siendo el manganeso un fuerte estabilizador de carburos, influye también sobre el tamaño del esferoide impidiendo su crecimiento al disminuir la difusión de carbono hacia los nódulos.

Fósforo

El fósforo no afecta ni la forma ni el tamaño de la fundición nodular, las porosidades pueden presentarse con exceso de fósforo, debiéndose limitar su contenido por el incremento del carbono y del silicio. El aumento de la porosidad se explica por el aumento del eutéctico fosforoso, de modo que este es el último en solidificar, produciendo la formación de microporosidades en los cristales, en las proximidades a las zonas eutécticas. En la fundición nodular esta actitud a la porosidad es muy marcada, cuanto que la contracción debida a la solidificación eutéctica es característica de la fundición nodular, que obtenidos postinoculación aumentó el número de células eutécticas, aumentando la porosidad.

Magnesio

Es el responsable de la nodulización del grafito en los hierros hipo e hipereutécticos, es un poderoso desulfurante y desoxidante. Si el contenido de O_2 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 el que produce dicha nucleación en forma nodular. Una de las teorías más aceptadas propone que existe una caída en el potencial de ionización de átomos de Mg lo que acompañado a la alta afinidad que existe en este estado entre el Mg y el C, y a la alta temperatura del baño, conduce a una interacción donador-receptor entre átomos de carbono y Mg, con la formación del complejo Mg^+-C^- . Este 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** (Mg total agregado como aleación menos el consumido en el proceso de desulfuración y desoxidación) que excede la cantidad requerida, 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. A continuación se muestra una tabla donde se muestra como varía el rendimiento para diferentes porcentajes de Mg.

Tabla 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 todo lo anteriormente dicho, la cantidad de Mg total a adicionar se puede determinar por medio de la fórmula siguiente:

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

Donde,

S1: Azufre antes del tratamiento.

S2: Azufre después del tratamiento.

n: 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 esto principalmente a la afinidad del Mg con el Azufre. 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 1100°C aproximadamente, en la zona de temperatura de fusión de la fundición de hierro, es decir, en la zona de 1200 a 1500°C; 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.

Cromo

Es el elemento promotor de carburo que es agregado para lograr una buena resistencia a la tracción y al desgaste, al calor, y a la corrosión. Sin embargo, promueve la formación de carburos libres lo que representa su principal desventaja y cuyo efecto se ve neutralizado por la adición de elementos grafitizantes al momento que se vaya a adicionar este. La adición de cromo se puede realizar directamente en la cuchara cuando se va agregar en proporciones bajas. Agregando el Cromo en porcentajes de 0.1-0.2% se afina la perlita y el grafito en las fundiciones. Para 1% se logra una gran cantidad una gran cantidad de carburos diseminados obteniendo así una fundición de alta dureza y una matriz estable a altas temperaturas, cuando se agrega hasta 0.5% combinado con 0.2% de Estaño se logra una alta estabilidad de la perlita a altas temperaturas y durante un tiempo apreciable.

Cobre

Este produce un endurecimiento de la ferrita que es considerado como un efecto directo, pues, además, causa indirectamente la grafitización de la fundición durante la solidificación en un término medio en comparación con el Silicio; el Cobre influye negativamente en la rata de crecimiento del grafito tanto así que en altas proporciones (3.2%) destruye completamente los esferulitos.

Estaño

La adición de este elemento tiene un gran efecto de la estabilidad y formación de la perlita, ya que por ejemplo un hierro cuya matriz es ferrítica sin estaño puede transformarse a perlítica con adiciones de pequeñas cantidades de este. La formación de la perlita como matriz acarrea cambios considerables en las propiedades mecánicas. La adición de Estaño puede causar un efecto nocivo en la formación de nódulos, esto se puede neutralizar con la adición de Cerio. Así por ejemplo para la neutralizar el efecto nocivo en la nodulización de 0.37% de Estaño se requiere 0.6% de Cerio.

Níquel

Durante la solidificación este elemento 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.

Según Peter [2010] dentro de los principales elementos se encuentran los siguientes:

Carbono.

En la práctica de la fundición en hornos eléctricos, el carbono deriva del hierro en lingotes, carburizantes y chatarra de hierro fundido. La carburización de cargas de chatarra de acero se logra agregando grafito de bajo azufre o coque grafitizado, la proporción de solución y la recuperación del carbono aumenta con la pureza de la fuente de carbono usada. En cúpula de fundido, el carbono también deriva del coque cargado. El rango óptimo para este elemento es de 3.4 a 3.85%, dependiendo del contenido de silicio. Por encima de este rango, hay peligro de flotación de grafito, (especialmente en secciones pesadas) y de un aumento en la expansión durante la solidificación, que conlleva a fragilizaciones, particularmente en moldes de arena blanda. Por debajo de este rango, las fragilidades pueden también ocurrir por la falta de carbono.

Silicio.

El silicio entra al hierro dúctil desde las materias primas, incluyendo chatarra de hierro fundido, hierro en lingotes y ferroaleaciones, y en pequeña parte desde el contenido de silicio de las aleaciones agregadas durante la inoculación. El rango preferente es de alrededor de 2 a 2.8%. Más bajos niveles de silicio conducen a una alta ductilidad en hierros tratados térmicamente, pero a peligros de carburos en las secciones delgadas, mientras que un alto contenido de silicio acelera el recocido y ayuda a evitar carburos en las secciones delgadas. Así como crece el contenido de silicio, la temperatura de transición dúctil-frágil en hierro ferrítico aumenta. La dureza y la resistencia a la tracción también aumentan.

Carbono Equivalente (CE).

Los contenidos de carbono, silicio y fósforo pueden ser considerados juntos como un valor de CE, que puede ser una guía muy útil para analizar el comportamiento de las fundiciones y algunas propiedades. Hay varias fórmulas de CE, y son muy usadas para calcular las propiedades de la fundición y la estructura solidificada del hierro. Cuando el carbono equivalente:

$$CE = c\% + 1/3 (Si\% + P\%)$$

Es igual a 4.3%, el hierro será de composición y estructura completamente eutéctica, y la desviación del valor de CE desde este valor es una medida de la cantidad relativa de eutéctico. Si CE es menor que 4.3%, habrá una porción de dendritas; si CE es mayor que 4.3%, habrá nódulos de grafito primario en la estructura. El grado de saturación Sc , es a veces usado, para expresar la proximidad a la composición eutéctica. El valor de Sc puede determinarse por la siguiente ecuación:

$$Sc = \%C / 4.23 - 0.3 (\%Si + \% P)$$

Cuando Sc es menor que 1, el hierro es hipoeutéctico y contendrá dendritas primarias. Si Sc es mayor que 1, habrá grafito primario en la estructura. El carbono equivalente líquido (CEL) es una medida de la temperatura de líquidos, la cual tiene un mínimo valor en la composición eutéctica; que es $CEL = \%C + \%Si / 4 + \%P / 2$. La máxima fluidez ocurre cuando es alcanzado este valor. El CEL solo puede ser medido convenientemente para hierros no tratados previamente con magnesio. Es usual pretender valores cercanos a 4.4 – 4.5, valores muy superiores a estos se restringen para evitar la flotación del grafito.

Manganeso.

La principal fuente de manganeso es la chatarra de acero usada en la carga. Este elemento debe ser evitado para obtener la máxima ductilidad. En hierros ferríticos este debe ser de 0.2% o menor. En hierros para ser usados en la condición perlítica, este puede estar en 1%. El manganeso esta sujeto a una microsegregacion indeseable, esto es así especialmente en secciones pesadas, en las que el manganeso fomenta la aparición de carburos en los bordes de grano, lo cual promueve a una baja ductilidad, baja tenacidad y perlita persistente.

Magnesio.

El contenido de magnesio requerido para producir grafito nodular, varia entre 0.04 y 0.06%. Si el contenido de azufre inicial es mas bajo que 0.015%, un contenido de magnesio mas bajo (0.035 a 0.04%) puede ser satisfactorio. Si el contenido de magnesio es demasiado bajo pueden obtenerse estructuras de grafito compacto con propiedades inferiores, mientras que un contenido demasiado alto puede promover a defectos superficiales.

Azufre.

El azufre deriva del cargado de materias primas metálicas. En cúpulas de fundido, este también es absorbido por el coque. Antes del tratamiento con magnesio, el contenido de azufre debe ser lo más bajo posible, preferiblemente por debajo de 0.02%. El contenido final de azufre del hierro dúctil está generalmente por debajo del 0.015%, pero si el cerio está presente, éste puede ser más alto por la presencia de sulfuro de cerio en el hierro. Contenidos finales excesivos de azufre son asociados con escorias de sulfuro de magnesio. Cuando se usa cúpula de hierro fundido, es común desulfurizar el metal generalmente con cal o carbura de calcio, continuamente o en series, antes del tratamiento de magnesio a niveles de 0.02% o menores.

Cerio.

Puede ser agregado para neutralizar partículas indeseables de elementos que interfieren en la formación del grafito nodular y para ayudar a la inoculación, en que pueden variar entre 0.003% y 0.01%. En fundiciones de muy bajo contenido de elementos menores, el cerio puede ser indeseable y puede promover formaciones de grafito no nodular, especialmente en secciones gruesas. El cerio es agregado como un constituyente menor en aleaciones de adición de magnesio e inoculantes para mejorar la estructura del grafito.

Elementos menores que promueven el grafito no nodular: **plomo, antimonio, bismuto y titanio** son elementos indeseables que pueden incorporarse en pequeñas partes con las materias primas en la carga, pero sus efectos pueden ser neutralizados con la adición de cerio. Elementos menores que promueven la perlita: **níquel, cobre, manganeso, estaño, arsénico y antimonio**, todos promueven la perlita y son listados en orden creciente de influencia. Pueden ingresar en el hierro como partículas constituyentes de la materia prima. El cobre hasta un 0.3% y el estaño hasta un 0.1% son usados deliberadamente cuando se requieren estructuras completamente perlíticas. Una carga de alta pureza es esencial para lograr estructuras completamente ferríticas o con recocido mínimo.

Aluminio.

La presencia de finísimas cantidades uniformes de aluminio en el hierro dúctil promueve la porosidad subsuperficial y superficial, por lo tanto debe ser evitado. La mayoría de las fuentes comunes de aluminio son contaminantes en

aceros y en chatarra de hierro fundido (como ejemplo tenemos, los pistones de aluminio provenientes de las chatarras de motores de aluminio). Otra fuente es el aluminio contenido en los inoculantes. Un porcentaje de aluminio tan bajo como 0.01% puede ser suficiente como para causar cavidades en el hierro dúctil conteniendo magnesio.

Fósforo.

Es normalmente mantenido por debajo del 0.05%, porque promueve fragilidades y reducciones en la ductilidad.

Elementos menores que promueven carburos: **romo, vanadio y boro son todos promotores de carburos.** El magnesio puede también acentuar los efectos estabilizantes de carburos de estos elementos, especialmente en secciones pesadas donde la segregación provoca la formación de carburos en los bordes de grano. Son controlados por una cuidadosa selección de las materias primas metálicas para fundición. [Peter E, 2010]

Elementos aleantes que promueven el endurecimiento. El níquel hasta un 2% y el molibdeno hasta un 0.75% son los elementos que se agregan generalmente para promover el endurecimiento cuando se vayan a aplicar tratamientos térmicos. Pequeñas cantidades de manganeso y cobre promueven también el endurecimiento, pero son normalmente usados en combinación con otros elementos. El cobre tiene una solubilidad limitada y debe ser mantenido por debajo del 1.5%. [Peter E, 2010]

Elementos aleantes para lograr propiedades especiales. Las estructuras de matriz austenítica son logradas por adición de 20% o más cuando se requiere resistencia al calor, a la corrosión o a la oxidación, y hasta un 5% de cromo puede también agregarse para tales fines. Los contenidos de níquel hasta un 36% producen hierros de propiedades controladas de baja expansión. Hasta un 10% de manganeso en los hierros austeníticos conduce a una baja permeabilidad magnética, y se acepta un bajo contenido de níquel para lograr una austenita estable. Un contenido de silicio de hasta un 6% produce estructuras de matriz ferríticas con reducido crecimiento, distorsión térmica y rotura a elevadas temperaturas. La adición de hasta un 2% de molibdeno a los hierros perlíticos, ferríticos y austeníticos confiere mejoras en el creep y resistencia a temperaturas elevadas. [Peter E, 2010]

1.5 Características de los Hornos de Fundición Eléctricos

La amplia variedad de inoculantes y nodulizantes que se comercializan nos permite utilizarlos de acuerdo a las necesidades del proceso. Estos productos están fabricados en los hornos de arco inmerso más modernos del mundo en donde se utilizan para su producción carbón vegetal y minerales de hierro de la más alta calidad. En estos momentos, el acero obtenido en horno eléctrico representa el 75 % de la producción total. Este hecho contribuye favorablemente a la conservación del medio ambiente, pues la energía eléctrica, a diferencia del carbón, no emite anhídrido carbónico al ser utilizada. Además, las empresas siderúrgicas intensifican su producción en horas nocturnas, en sábados y festivos, cuando la generación de electricidad, mediante plantas nucleares, alcanza una proporción muy superior a la media. Pero, además de estas ventajas, del horno eléctrico se pueden citar otras, este se alimenta de chatarra férrea, que se obtiene recuperando residuos para convertirlos en materia prima. [Prosid, 1999]

1.5.1 Horno de Inducción Eléctrica

En estos hornos el calentamiento viene a causa de las corrientes inducidas en la masa metálica por una bobina, que circunda el crisol, alimentada por una corriente alterna. La bobina es constituida de muchos espirales de tubo de cobre refrigerado por agua, las corrientes inducidas se ponen en la periferia de la masa metálica y circulan en un estado anular de pequeño espesor. Este anillo constituye un espiral cerrado en corto circuito y funciona como el secundario de un transformador cuyo primario es la bobina exterior. Como se trata de un solo espiral las corrientes inducidas tienen una intensidad elevada y por está razón el calentamiento de la masa metálica viene con rapidez (se puede alcanzar temperaturas entre 2800 y 3000 o C). [Prosid, 1999]

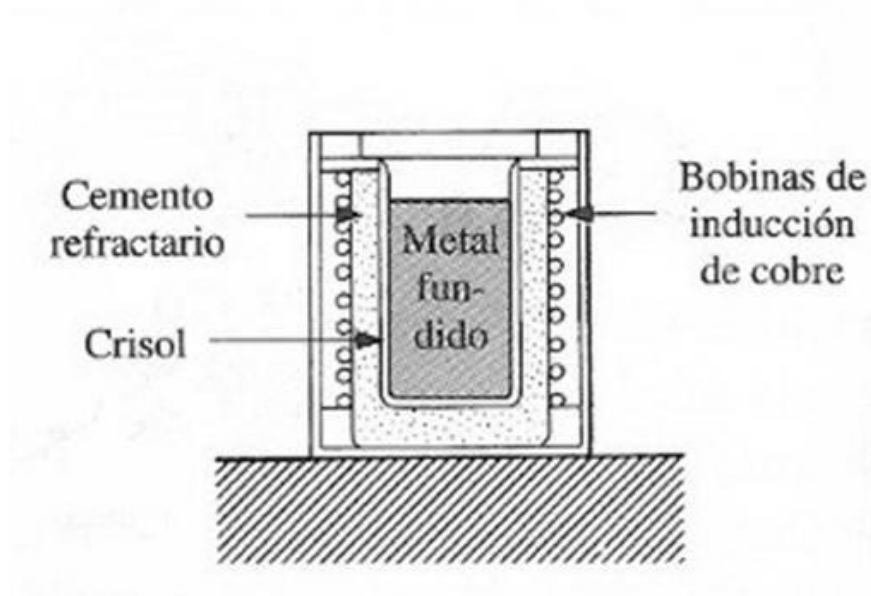


Figura 4. Horno de Inducción Eléctrica.

1.5.2 Horno de Arco Eléctrico Directo

El horno eléctrico se introdujo por primera vez en Estados Unidos en 1906. Son procedimientos que han alcanzado gran difusión, pues permiten obtener aceros muy puros, resistentes y uniformes. En los hornos, el calor se genera mediante el arco eléctrico, por la resistencia que la masa de hierro presenta al paso de la corriente o por la producción en aquella masa de las llamadas corrientes de Foucault. En uno de estos procedimientos, se funde en un crisol de arcilla refractaria, hierro dulce de elevada pureza, con cantidades perfectamente

medidas de fundición de hierro. Obteniéndose así aceros que se emplean en la fabricación de herramientas de precisión e instrumentos delicados. La fuente de calor es un arco eléctrico continuo, que se forma entre los electrodos y el metal cargado. En este tipo de hornos se generan temperaturas tan altas como 1925°C (3500°C). Existen normalmente tres electrodos de grafito, que pueden ser de hasta 750 mm (30 pulg.) de diámetro y de 1.5 a 2.5 m (5 a 8 pies) de longitud. Su altura dentro del horno se puede ajustar en respuesta a la cantidad de metal presente y al desgaste de los electrodos. En el horno eléctrico se introduce chatarra de acero y una pequeña cantidad de carbono y de cal a través del techo abierto. (Los hornos eléctricos también se pueden cargar con 100% de chatarra). El techo se cierra y se bajan los electrodos. Se establece la conexión y dentro de un periodo de aproximadamente 2 horas, el metal se funde. La corriente entonces es desconectada, se elevan los electrodos, el horno es inclinado y el metal fundido es vaciado en una olla de traslado, que es un recipiente utilizado para la transferencia y vaciado del metal fundido. Las capacidades de los hornos eléctricos van de 60 a 90 toneladas de acero por día. La calidad del acero producido es mejor que el de hogar abierto o del proceso de oxígeno básico. [Prosid, 1999]

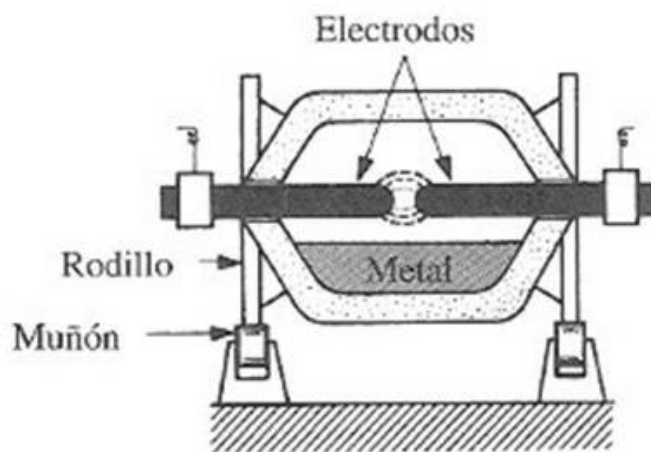


Figura 5. Horno de Arco Eléctrico Directo.

1.5.3 Horno De Arco Eléctrico Indirecto

Este tipo de horno consta de un crisol elaborado en material refractario, el cual se encuentra rodeado por una caja constituida de ladrillo refractarios; en sus paredes laterales, la caja tiene un par de orificios opuestos por donde se colocan horizontalmente dos electrodos de grafito comprimido los cuales a su vez están conectados un transformador, igual que en el horno de arco eléctrico directo, este horno tiene una puerta de carga y la boca del horno, además se cuenta con un mecanismo que inclina completamente el conjunto para la extracción de las escorias y el acero. Este horno trabaja de similar forma que el horno de arco eléctrico directo empleando las mismas materias primas, con excepción de la generación del arco eléctrico. En el horno de arco eléctrico directo, el arco se produce entre los electrodos verticales y el metal mientras que para este se produce entre los dos electrodos horizontales al acercarse lo suficiente uno al otro. [Prosid, 1999]

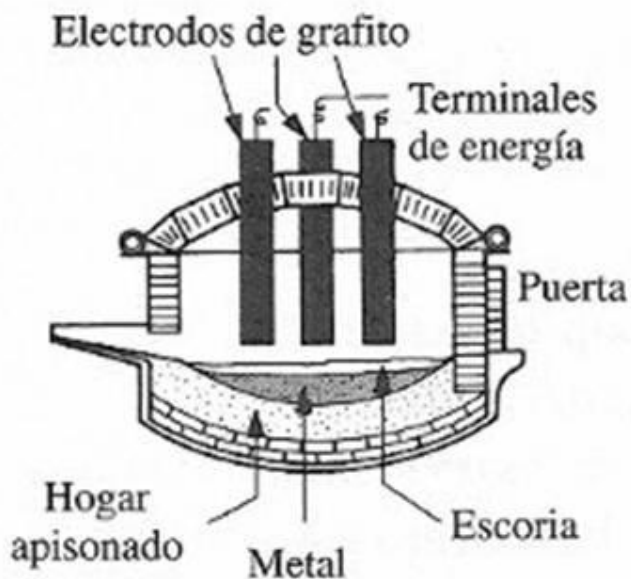


Figura 6. Horno de Arco Eléctrico Indirecto.

1.5.4 Horno Eléctrico y Cuchara

ILARDUYA [2011] suministra una amplia gama de Ferroaleaciones adaptadas para su incorporación directa en horno eléctrico y en cuchara de colada. Las ferroaleaciones se presentan en diferentes tamaños y se suministran a granel, en bolsas de 50 Kg o bolsitas calibradas con 0,5 Kg de elemento aleante. Los elementos que se incorporan mediante las ferroaleaciones permiten modificar las propiedades del hierro.

Ferro-silicio: El Silicio favorece la grafitización del carbono de la fundición. Desoxida el hierro y actúa como inoculante afinando y orientando la precipitación del grafito con lo cual mejora las características mecánicas de las piezas evitando el blanqueo en los vértices de las mismas.

Ferro-manganeso: Desulfura la fundición, perlitiza e incrementa la resistencia a la tracción y la dureza Brinell.

Ferro-cromo: Antigrafitizante, afina el grano, mejora las resistencias a la tracción, flexión, corrosión, desgaste, etc...Con porcentajes del 1 2 % mejora la resistencia al calor.

Cobre: Afina el grano dando estructura perlítica. Mejora la resistencia a la tracción y la dureza. Homogeneiza la dureza en la peza.

Ferro-molibdeno: Aumenta sustancialmente la resistencia a la tracción. Proporciona tenacidad, dureza elevada y una gran resistencia al desgaste.

Níquel: Elemento grafitizante que proporciona una fundición con gran resistencia, compacta y densa. Homogeneiza las características mecánicas en los diferentes espesores de la pieza. Mejora la maquinabilidad de las piezas fundidas.

Carburo de calcio: Producto utilizado para desulfurar el hierro.

1.6 Composición Química de los Elementos de la Industria del Níquel.

Sulfuro de Níquel y Cobalto:

Composición química:

Níquel	Ni	-	25 %	máx
Cobalto	Co	-	6 %	mín
Hierro	Fe	-	3 %	máx
Cinc	Zn	-	0.05 %	máx
Agua	H ₂ O	-	10 %	máx
Amoniaco	NH ₃	-	4 %	máx
Oxido de Magnesio	MgO	-	3.5 %	máx
Cobre	Cu	-	3 %	máx
Manganeso	Mn	-	0.09 %	máx
Oxido de silicio	SiO ₂	-	4 %	máx
Oxido de calcio	CaO	-	0.10 %	máx

Cola (Desecho de lixiviación) (Pulpa)

Composición química:

Níquel	Ni	-	0.33	%
Cobalto	Co	-	0.08	%
Hierro	Fe	-	42 - 45	%
Oxido de Magnesio	MgO	-	5	%

Cobre	Cu	-	0.02	%
Oxido de silicio	SiO ₂	-	10	%

Cola de desecho: (La que se envía a la presa de cola)

Composición química:

Peso volumétrico - 1.45 t/m³

Relación sólido - líquido (en peso) - 0.724:1

Peso volumétrico del sólido - 3.8 t/m³

Concentración de amoniaco - 0.3 – 0.7 g/L

Concentración de hierro 42 – 45 %....

➤ **Oxido de Níquel Sinterizado.**

Es un material obtenido producto de la aglomeración y la reducción parcial del óxido de Níquel en la máquina de sinterizar.

Características físicas:

Es un material grueso en forma de terrones porosos con un tamaño hasta de 38.1 mm y virtualmente libre de finos de un color gris oscuro con brillo metálico.

Tabla 4. Características químicas del óxido de níquel sinterizado.

Índice	U/M.	Parámetros	
Contenido por elementos	%	Ni	86.0 Mín., 93.0 Máx.
		Co	1.2 máx.
		Fe	0.90 máx.
		Cu	-
		Zn	-
		S	0.06 máx.
		C	0.35 máx.

➤ **Oxido de Níquel en polvo metalúrgico:**

Es un material producto de la trituración del óxido del níquel calcinado cuya granulometría es de 0.074 mm en un 98%.

Características físicas:

Es un material en forma de polvo, es decir, de una granulometría muy fina, tiene un color gris verdoso.

Tabla 5. Características químicas del níquel en polvo metalúrgico.

Índice	U/M.	Parámetros	
Contenido por elementos	%	Ni	75 Mín.
		Co	1.45 máx.
		Fe	0.50 máx.
		Cu	-
		Zn	-
		S	0.05 máx.

➤ **Oxido de Níquel químico:**

Es un material producto de la trituración del óxido del níquel calcinado el cual es sometido a un proceso de clasificación y desmagnetización cuya granulometría es de 0.044 mm \geq 99% y (0.0044 a 0.074) mm el 1%

Características físicas:

Es un material en forma de polvo, es decir, de una granulometría muy fina, tiene un color gris verdoso.

Tabla 6. Características químicas del óxido de níquel químico.

Índice	U/M.	Parámetros	
Contenido por elementos	%	Ni	75 MÍN.
		Co	0.80 MÁX.
		Fe	0.50 MÁX.
		Cu	-
		Zn	-
		S	0.04 MÁX.
		C	0.01 MÁX.
		Ni Metálico	0.5 MÁX.

1.6 Conclusiones Parciales

No existen referencias específicas sobre la producción de nodulizante para la obtención de hierro nodular, a partir de las colas de la industria niquelífera bajo las condiciones cubanas.

2. OBTENCIÓN DE NODULIZANTE CON PRODUCTOS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA DEL NÍQUEL.

2. OBTENCIÓN DE NODULIZANTE CON PRODUCTOS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA DEL NÍQUEL.

2.1 Análisis de la composición química de los residuales de la Industria del níquel.

Con el objetivo de definir ¿Cuál ó cuales son los productos residuales de la industria niquelífera, que por sus características físicas y composición química pueden ser utilizados en la obtención nodulizante alternativo? Analizamos los datos suministrados por el Centro de Investigaciones del Níquel (CEINNIQ) en colaboración con el ISMM "Dr. Antonio Núñez Jiménez" , incorporados en la tabla 7 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 7. 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

Para la selección de la cola más eficiente tecnológicamente la selección debe cumplir dos condiciones:

1. Mayor % de Magnesio (Mg) porque será utilizado como el elemento modificador.
2. Menor % de Azufre (S) porque es el elemento desmodificador.

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.

7, demuestra convincentemente 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.

La composición mineralógica cualitativa de las colas se presenta en la tabla 8.

Tabla 8. Composición mineralógica de las colas de Nicaro y PSA.

Nombre de la fase	ERRL Contenido aprox. %	PSA Contenido aprox. %
Magnetita	55,71	-
Olivino	21,64	-
Minerales arcillosos	9,66	-
Cuarzo	5,12	-
Cromoespinela	3,98	-
Minerales de manganeso	0,81	-
Hematita	-	70 - 75
Sulfuro básico de aluminio	-	8 - 12
Yeso	-	4 - 6
Aluminocromita	-	3 - 5
Olivinos	-	1 - 2

En la tabla 9 se muestra la composición química de las escombreras que existen en la mina de la fábrica "René Ramos Latour" de Nicaro, en la mina de la Empresa "Pedro Soto Alba" y en la mina de la fábrica "Ernesto Che Guevara" de Moa, las cuales constituyen también una fuente de materia prima que pueden ser procesadas por biolixiviación.

Tabla 9. Composición química de las escombreras de la E.P.S.A y E.E.C.G % (promedio).

Composición	E.P.S.A	E.E.C.Guevara
Ni	0,73 - 0,89	0,6 - 0,8
Co	0,051- 0,083	0,025 - 0,136
Fe	48,6 – 51,94	43 - 46
SiO ₂	6,80 – 2,78	1,7 - 2,5
Al ₂ O ₃	9,61 – 7,56	7 - 14
MnO	0,619 – 0,54	0,71- 0,15
Cr	-	2,7 - 4
MgO	0,697 – 0,65	0,73 -1,2
Cu	0,010	0,018 – 0,022

2.2 Cálculo de los parámetros tecnológicos del horno discontinuo de cuba alta de 500 mm de diámetro interior.

La Empresa de Fundiciones Acero – Hierro de Holguín consta de dos hornos de cubilote de 720 mm y 500 mm de diámetro interior respectivamente, para la obtención del nodulizante seleccionamos el de 500 mm, debido a disponer de un ventilador con el soplo necesario tecnológicamente para servir en la piquera el caldo metálico a 1420 °C, al realizar el análisis de los parámetros encontramos errores en los cálculos tecnológicos que no nos permiten la conducción de una colada eficiente, por lo que a continuación desarrollamos todos los cálculos de los parámetros tecnológicos.

2.2.1 Características del Horno de cubilote propuesto.

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 4 columnas de apoyo, las cuales están fijadas al cimiento.

En el centro de la plancha base se encuentra una abertura de diámetro **500 mm** igual al diámetro interior del refractario del cubilote, donde se coloca la tapa de cierre y es fijada por medio de un puntal.

Piquera u Orificio de Descarga: Se encuentra en la superficie de 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° hacia abajo para que el metal corra libremente.

Bigotera de Escoria: Es un orificio situado a 90° 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.

Toberas: Son 3 y están situadas a 120° y una altura de 617.72 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_{IT}) será igual al 20 % del área interior del cubilote.

$$A_{IT} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{3,1416 \cdot (7.5)^2}{4} = 44,1788 dm^2$$

$$d = d_t + d_r = 5,0 + 2,5 = 7,5 \text{ dm}$$

Donde:

d_t = Diámetro de trabajo.

d_r = Diámetro del revestimiento.

$$A_T = 20\% \cdot A_{IT} = \frac{20 \cdot 44,1788}{100} = 8,8358 dm^2$$

Por lo tanto el área de una tobera será igual al área total dividida por 3 toberas.

$$A_T = \frac{8,8358}{3} = 2,9453 dm^2$$

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, es decir $\varnothing 100 \text{ mm}$.

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 barretear el coque para su mejor descenso.

Ventana de Trabajo: Se encuentra a 180° con relación a la piquera 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, las dimensiones de ella serán de 300 x 400 mm.

Caja de Aire: Comienza en la parte superior de las toberas y tendrá una altura de 570 mm y un ancho de 360 mm, separado 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.

Boca de Carga: Se encuentra a 180° con relación a la piquera, en la parte posterior del horno, a una altura tomada desde el piso o solera hasta su borde inferior igual a 6 veces el diámetro interior del cubilote. Su tamaño varía de acuerdo al método de carga utilizado.

$$H = 5,0 \text{ dm} \times 6 = 30,0 \text{ dm}$$

Chimenea: La altura de la chimenea debe sobresalir el techo del edificio con su correspondiente cobertura a la que algunas veces se adiciona un apaga chispas. 110.0 d m.

Ventilador: Son de tipo centrífugo, cuya capacidad deberá estar de acuerdo al volumen de aire necesario según la productividad del cubilote.

Datos Técnicos:

Diámetro interior del cubilote: **5,00 dm**

Área interior del Cubilote:

$$A_{IC} = (5,0)^2 \cdot \frac{3,1416}{4} = 19,635 \text{ dm}^2$$

Altura de la Cuba:

$$H_{CUBA} = \frac{A_{IC}}{d_T} = \frac{19,635 \text{ dm}^2}{5,0 \text{ dm}} = 3,927 \text{ dm}$$

$$H_{\text{Toberas}} = H_C + H_{\text{Bigotera}} + 1,20 = 3,927 + 0,50 + 1,20 = \mathbf{5,627 \text{ dm}}$$

Cálculo de La Productividad:

Es igual al Área interior del cubilote por el factor empírico según la relación Carga de hierro – Coque.

Tabla 10. Factor empírico.

<u>Relación</u>	<u>Factor</u>
6 : 1	0,047
8 : 1	0,0622
10 : 1	0,072
12 : 1	0,0925

Tomando una relación de **12:1** el factor es de 0,0925 nuestro cubilote de 5.0 dm de diámetro con un área de 19.635 dm² y de la tabla 10 escogemos el factor de acuerdo a la relación seleccionada para producir:

$$19,635 \text{ dm}^2 \times 0,0925 = \mathbf{1,8162 \text{ t/h}}$$

La carga de coque del cubilote es fija 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 de 1/12 hasta 1/10 del diámetro del cubilote.

Para nuestro cubilote el diámetro del coque será de 500/12 hasta 500/10, o sea, 41,66 hasta 50 mm respectivamente pero en la práctica se utiliza de 50 hasta 120 mm.

Cantidad de Coque necesario por carga:

La altura de la carga de coque debe estar entre 1,2 y 1,5 dm. La media será de 1,35 dm. El volumen de coque será:

$$V_{\text{Coque}} = 19,635 \text{ dm}^2 \times 1,35 \text{ dm} = \mathbf{26,5073 \text{ dm}^3}$$

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 hay que tomar en consideración que el peso del mismo varía según su tamaño, para un volumen determinado en la forma siguiente:

Tabla 11. Peso del coque.

Tamaño del Coque	Peso (Kg./ dm³)
25 a 60 mm	0,53
60 a 90 mm	0,48
75 a 100 mm	0,45
100 a 175 mm	0,43

Para un tamaño del coque entre 25 a 60 mm corresponde al grupo 1, cuyo peso es de $\approx 0,53 \text{ Kg. / dm}^3$.

De la tabla 11 seleccionamos el valor del peso del coque correspondiente al tamaño del mismo.

El peso de la carga de coque será de:

$$26,5073 \text{ dm}^3 \times 0,53 \text{ Kg. / dm}^3 = \mathbf{14,0489 \text{ Kg.}}$$

La cantidad de coque debe estar dentro de los parámetros siguientes:

Tabla 12. Parámetros del coque.

Carbón fijo	Sobre 86 %
Cenizas	Menor del 12 %
Azufre	Menor del 0.8 %
Materias Volátiles	Menor del 2 %
Humedad	Menor del 3 %

Cantidad de Carga Metálica por Carga:

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 **12:1** nuestra carga metálica será de:

$$Q_{\text{Metálica}} = 14,0489 \times 12 = \mathbf{168,5868 \text{ Kg}}$$

Fundente: Se utiliza generalmente de 1,5 a 2,5 % por Kg. de metal cargado, dependiendo del grado de oxidación de los materiales de la carga metálica se toma hasta un 3 %.

$$Q_{\text{Caliza}} = 168,5868 \text{ Kg} \times 0,03 = \mathbf{5,0576 \text{ kg}}$$

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 CaCO_3 .

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 nuestro caso, necesitamos un volumen de aire de:

$$V_{\text{Aire}} = 14,0489 \text{ Kg.} \times 9 \text{ m}^3 / \text{Kg.} = \mathbf{126,4401 \text{ m}^3}$$

Por tanto, para producir 1 t/h de metal líquido, necesitamos un volumen de aire de:

$$C_{\text{arga}} = \frac{1000 \text{ Kg/h}}{168,5848 \text{ Kg}} = 5,9317 \text{ Cargas / h de coque en 1 hora.}$$

$$V_{\text{Aire / ton}} = 5,9317 \times 126,4401 \text{ m}^3 = \mathbf{750,0047 \text{ m}^3 \text{ de aire / h.}}$$

Altura de la Cama de Coque:

Esta puede variar desde 710 hasta 1345 mm sobre el borde superior de las toberas. La altura depende de la presión de aire en cm. de H₂O, medida en la caja de aire que puede variar desde 38 a 55 para cubilotes de 500 mm de diámetro, por lo que la altura de la cama de coque podrá obtenerse por la siguiente fórmula empírica:

$$(\sqrt{P \times 124}) + 150 = \text{Altura de la Cama de Coque.}$$

Para el cálculo tomamos las 2 presiones.

$$(\sqrt{38 \times 124}) + 150 = \mathbf{914,3873 \text{ mm}}$$

$$(\sqrt{55 \times 124}) + 150 = \mathbf{1069,6086 \text{ mm}}$$

Se selecciona la **altura mayor. 1069,6 mm.**

$$H_{\text{Total Cama de Coque}} = H_{\text{Toberas}} + H_{\text{Cama de Coque}}$$

$$H_{\text{Total Cama de Coque}} = 5,627 + 10,696086$$

$$H_{\text{Total Cama de Coque}} = 16,3231 \text{ dm}$$

$$Q_{\text{Cama de Coque}} = 19,635 \text{ dm}^2 * 16,3231 \text{ dm} * 0,53 \text{ kg}$$

$$Q_{\text{Cama de Coque}} = 169,8672 \text{ kg.}$$

Una vez hecha las correcciones tecnológicas de los parámetros del fusor de cubilote, realizamos el análisis y selección de la cola a escoger según las composiciones químicas que se muestran el capítulo 2 en tabla 7. Composición química de las colas de Moa y Nicaro. (Centro de Investigaciones del Niquel).

2.3 Selección de la cola

Para esta selección tenemos en cuenta que el Mg es el principal modificador y que los parámetros de mayor eficiencia se encuentran de 4 – 8 %, como se muestra en el capítulo 1 en la Tabla 3. Rendimiento a diferentes porcentajes de Mg, la cola ERRL es la 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 por cientos recomendados por los principales productores.

2.3.1 Desarrollo empírico del experimento para determinar la eficiencia de la cola ERRL.

Para la determinación de la efectividad de la utilización de la cola tomamos 5 porciones de CERRL aumentando 50 gr. Cada una como se muestra en la tabla 13. Corridas del experimento, manteniendo constante el % de CaCO₃ y Al.

Tabla 13. Corridas del experimento.

No	Componentes (gr)		
	Cola ERRL	Piedra Caliza (CaCO ₃)	Aluminio
1	100	300	13,9
2	150	300	13,9
3	200	300	13,9
4	250	300	13,9
5	300	300	13,9

Elaboramos un molde con 6 probetas como se muestra en la figura 7.



Figura 7. Molde para la demostración empírica. Izquierda: Caja inferior. Derecha: Caja superior.

Se prepararon 5 probetas y se cargaron las porciones de cola pesadas y la sexta que funcionó como colector de escoria, se tomo como testigo, la parte experimental se desarrollo en el laboratorio de metalografía de la UHO, para el cual se utilizó el Metallurgical Microscope NJF – 120A INSTRUCTION MANUAL, las fotos se efectuaron en un microscopio marca NOVEL a 200x de aumento con una cámara marca CANON de 8 MPi obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 14. Resultados de la primera corrida.


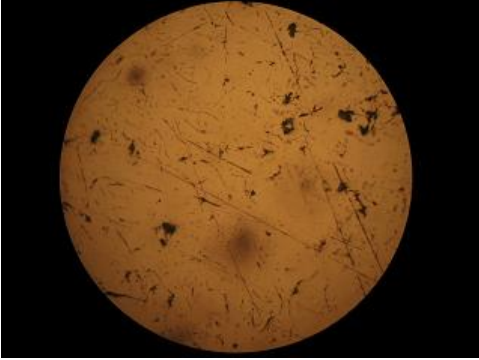

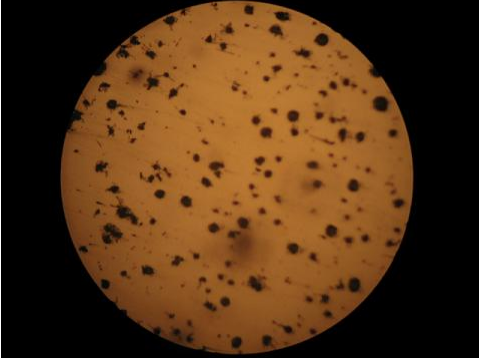
N o	Cantidad de Nodulizante (gr)	Método de Vertido	Probetas	Estructuras
1	100	Estático		
		Dinámico		
Observaciones		En el vertido estático se observa una estructura laminar con insipientes nódulos y en el dinámico se obtienen nódulos definidos.		

Tabla 15. Resultados de la segunda corrida.


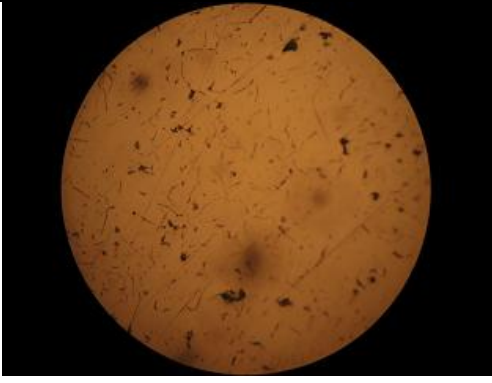

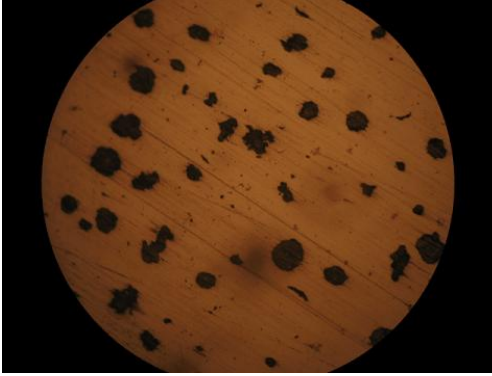
N o	Cantidad de Nodulizante (gr)	Método de Vertido	Probetas	Estructuras
2	150	Estático		
		Dinámico		
Observaciones		En el vertido estático se observa una estructura laminar con insipientes nódulos y en el dinámico se obtienen nódulos de mayor tamaño y definición.		

Tabla 16. Resultados de la tercera corrida.


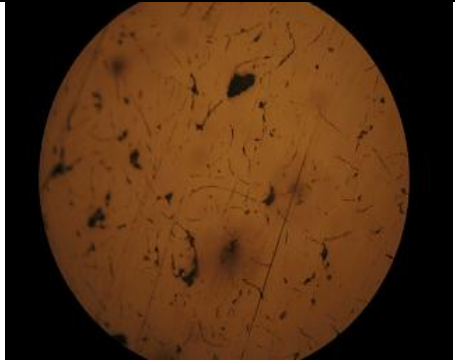


N o	Cantidad de Nodulizante (gr)	Método de Vertido	Probetas	Estructuras
3	200	Estático		
		Dinámico		
Observaciones		En el vertido estático se observa estructura laminar con la aparición vermicular y en el dinámico los nódulos disminuyen de tamaño y mantienen la definición.		

Tabla 17. Resultados de la cuarta corrida.


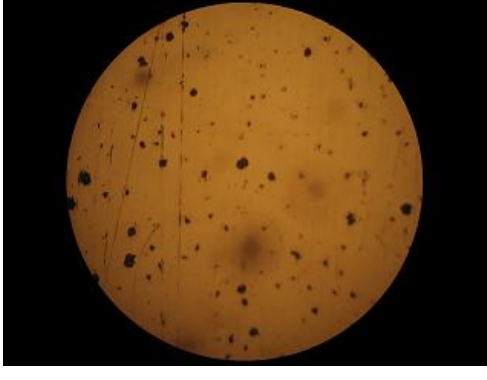

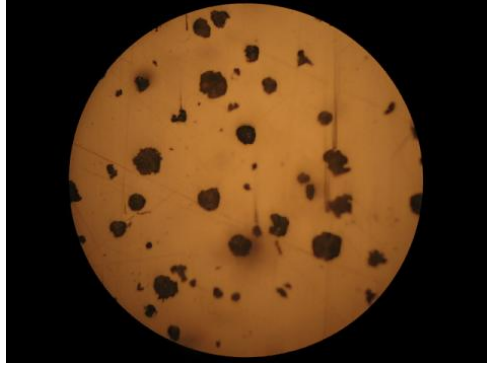



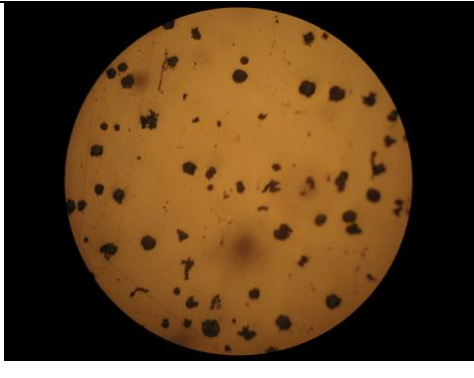
N o	Cantidad de Nodulizante (gr)	Método de Vertido	Probetas	Estructuras
4	250	Estático		
		Dinámico		
Observaciones		En el vertido estático se observa la aparición de nódulos definidos y en el dinámico los nódulos aumentan de tamaño y mantienen la definición.		

Tabla 18. Resultados de la quinta corrida.

N o	Cantidad de Nodulizante (gr)	Método de Vertido	Probetas	Estructuras
5	300	Estático		
		Dinámico		
Observaciones		En el vertido estático se observa el aumento de los nódulos y la definición y en el dinámico los nódulos mantienen el tamaño y la definición.		


Conclusiones del experimento

Las corridas se realizaron sin poder medir el % de S, ni conocer las temperaturas de vertido, dos parámetros determinantes en la modificación de los hierros de alta resistencia, por lo que no se puede dar una explicación a la desproporción de los nódulos, pues no se puede definir si es por modificación insipiente ó producto del comienzo de la desmodificación, pero si queda claro con el experimento y queda demostrado y se cumple con los objetivos de esta investigación en cuanto a la utilización de la cola de la ERRL como nodulizante en la obtención de hierro nodular de manera competitiva y sustentable.

2.4 Instrucción tecnológica de producción de nodulizante

Para la utilización de la cola de la Empresa René Ramos Latour en la obtención de nodulizante se establece la siguiente instrucción tecnológica en la tabla 14.

Tabla 14. Instrucción Tecnológica.

	INSTRUCCIÓN	Código: IT 4.5.1-09
	PRODUCCION DE NODULIZANTE CERRL	Revisión: 01 Fecha: 15/06/2011 Página: 1 de 7

INDICE

1.0 Objetivo.

2.0 Alcance.

3.0 Definiciones.

4.0 Responsabilidades.

5.0 Referencias.


6.0 Desarrollo.

7.0 Registros.

Anexos:

I. Modelo "Control del Vertido".

Elaborado por: Arel Montejo Rodríguez Diplomante.	Revisado por: MSc. Rigoberto Pastor Sánchez Figueredo Tutor.	Aprobado por: Ing. Alexis Ronda Oro Oponente
---	---	--

	INSTRUCCIÓN	Código: IT 4.5.1-09
	PRODUCCION DE NODULIZANTE CERRL	Revisión: 01 Fecha: 15/06/2011 Página: 2 de 7

1. OBJETIVO.

Describir los pasos a seguir para la producción del nodulizante CERRL.

2. ALCANCE.

La presente Instrucción es aplicable a la producción del nodulizante CERRL.

3. DEFINICIONES.

No se aplica.

4. RESPONSABILIDADES.

4.1 El Jefe de brigada de fusión tiene la responsabilidad de que se cumpla estrictamente lo descrito en esta instrucción.

4.2 El controlador de la calidad tiene la responsabilidad de:

- Velar por que se cumpla lo descrito en esta instrucción.
- Medir la temperatura del metal.
- Llevar la probeta para ensayos al laboratorio.

4.3 El resto de las responsabilidades se encuentran descritas en el acápite desarrollo.

5. REFERENCIAS.


No se aplica.

6. DESARROLLO.

6.1 Generalidades.

6.1.1 Antes del vertido de los moldes el J' de Brigada de Fusión debe conocer:

- El número, el peso, la cantidad y el tipo de piezas que se van a verter.
- La composición química de la aleación a verter, la temperatura de vertido del molde, peso de metal en el mismo, tiempo de mantenimiento del metal líquido en el molde hasta desmoldeo y la situación de los pesos para la carga de los moldes.

	INSTRUCCIÓN	Código: IT 4.5.1-09 Revisión: 01 Fecha: 15/06/2011 Página: 3 de 7
	PRODUCCION DE NODULIZANTE CERRL	

6.2 Lugar de trabajo y equipamiento de los vertedores. El área o lugar de trabajo de los vertedores incluye:

6.2.1 El área de toma del metal líquido de los hornos, el área de colada de la granallera y las áreas de vertidos en las cuales están situadas los moldes que se van a verter.

6.2.2 En la colada se utilizan los equipos y herramientas siguientes:

- Cubos de vertido de 2 t; 1.2 t; 0,3 t y 0,08 t.
- Grúa puente.
- Mecanismo de vertido.
- Carro para transportar las cazuelas.
- Herramientas: Palancas, limpiadores, tubo de acero de Ø 14mm.
- Balón de oxígeno.

6.2.3 En la preparación del nodulizante se utilizan los siguientes materiales:

1. Envase de aluminio (ENVAL).
2. Cola de la Empresa René Ramos Latour.
3. Piedra caliza.

6.2.4 Secuencia de preparación del nodulizante.

Echar en el envase ENVAL 300g de cola de la ERRL.

Completar el envase ENVAL con piedra caliza triturada.


6.3 El Jefe de Brigada de Fusión debe revisar el estado técnico de las grúas viajeras y la posibilidad de ejecutar todos los mandos correctamente.

6.4 Los vertedores están obligados a:

6.4.1 Revisar el buen estado del revestimiento refractario de los cubos de vertido a utilizar así como el funcionamiento y centrado del seguro.

6.4.2 Revisar el estado del mecanismo de inclinación e izaje de los cubos de vertido.

6.4.3 Revisar que todas las herramientas necesarias se encuentren en el área.

	INSTRUCCIÓN	Código: IT 4.5.1-09 Revisión: 01 Fecha: 15/06/2011 Página: 4 de 7
	PRODUCCION DE NODULIZANTE CERRL	

6.4.4 Retirar todo tipo de objetos y materiales que no se necesitan y que pueden provocar accidentes.

6.4.5 Preparar la cantidad de ferroaleaciones necesarias para modificar la aleación a obtener y su colocación en los cubos antes de la colada

6.5 Secuencia de actividades para el vertido:

(La colada sólo se realizará después de la preparación del lugar de trabajo, herramientas y los equipos según las responsabilidades de los implicados).

6.5.1 Preparar los moldes para verter la probeta tecnológica para ensayos en presencia del Controlador de la Calidad y del Jefe de Brigada de Fusión.

6.5.2 En el caso que corresponda se colocarán las adiciones y ferroaleaciones en el fondo del cubo previamente calentado.

6.5.3 Se colocara en la piquera del horno el nodulizante CERRL.

6.5.4 Vertido del metal al cubo.

6.5.5 Limpiar la escoria si fuera necesario. Adicionar 2 palas de coque caliente al espejo del metal.

6.5.6 Medir la temperatura del metal dentro de las cazuelas según la tecnología.


6.5.7 Efectuar el vertido de la probeta para ensayos, en presencia del controlador de la calidad y el jefe de brigada.

6.5.8 Transportar el cubo por medio del carro hasta el área de vertido correspondiente. Adicionar al espejo del metal un ladrillo refractario de desecho previamente calentado, colocándolo de forma tal que obstruya el paso de la escoria a través del labio de la cazuela.

6.5.9 Transportar el cubo por medio de la grúa hasta el molde.

6.5.10 Bajar el cubo hacia el tragadero del molde, siendo la altura o distancia del flujo líquido no mayor de 150 – 200 mm.

6.5.11 Realizar el vertido 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.

	INSTRUCCIÓN	Código: IT 4.5.1-09 Revisión: 01 Fecha: 15/06/2011 Página: 5 de 7
	PRODUCCION DE NODULIZANTE CERRL	

6.5.12 Evitar que el metal líquido se derrame por la parte superior de las mazarotas y respiraderos del molde.

6.5.13 Si durante el vertido el molde hierve, se producen explosiones o se escapa el metal por el (los) plano divisorio el vertido se interrumpe.

6.5.14 El metal que sobra en los cubos se vierte en las lingoteras.

6.5.15 Después de terminado el vertido se procede a la limpieza del cubo, utilizando para ello los tubos de acero Ø 14mm y el balón de Oxígeno, hasta eliminar el metal incrustado. Además deben limpiar y reparar las herramientas que han sido utilizadas.

6.6 Protección e higiene del trabajo.

6.6.1 Los vertedores deben ser instruidos respecto a las técnicas de seguridad, protección e higiene del trabajo y a lo establecido en la presente instrucción.

6.6.2 Está prohibido:

- Utilizar cubos de fundición húmedos, mal secados o que no han sido calentados hasta el rojo la primera vez que se han utilizado.
- Utilizar cubos de fundición con partes exteriores locales rojas.
- Utilizar herramientas húmedas y defectuosas.
- Verter el metal en el piso. Verter la escoria en otro lugar que no sean los preparados para ello (Palets).
- Pasar y permanecer debajo del cubo de vertido.
- Transportación de cubos de fundición que no estén protegidos al giro contrario o con el mecanismo de seguridad defectuoso.
- Trabajar con grúas defectuosas.
- Trabajar con el mecanismo de vertido de monorriel defectuoso.
- Utilizar la grúa por personas que no posean la calificación correspondiente.


6.7 Frecuencia de cumplimiento:

Durante la jornada de la fusión en los hornos de cubilote.


7. REGISTROS.

7.1 R 4.5.1-xx "Control del Vertido"

7.2 Los registros se controlan según lo establecido en el PG 1.2.4-04 "Control de los Registros de la Calidad".

	INSTRUCCIÓN	Código: IT 4.5.1-09 Revisión: 01 Fecha: 20/03/2007 Página: 6 de 7
	PRODUCCION DE NODULIZANTE CERRL	

Anexo I.

	INSTRUCCIÓN	Código: IT 4.5.1-09 Revisión: 01 Fecha: 15/06/2011 Página: 7 de 7
	PRODUCCION DE NODULIZANTE CERRL	

Estado de revisión

Página	Revisión	Fecha
1	01	15/06/2011
2	01	15/06/2011
3	01	15/06/2011
4	01	15/06/2011
5	01	15/06/2011
6	01	15/06/2011
7	01	15/06/2011

Elaborado por: Karel Montejo Rodríguez
Diplomante

Firma:

Revisado por: MSc. Rigoberto Sánchez Figueredo
Tutor

Firma:

Aprobado por: Ing. Alexis Ronda Oro
MSc. Raúl Reyes Camareno

Firma:

Firma:

2.5 Valoración Técnico – Económica.

Para realizar una valoración económica entre el Nodulan 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 incorporan a la tabla 15.

Tabla 15. Comparación del comportamiento de los Índices Tecnológicos.

No	Parámetros	Nodulizante		Eficiencia	
		Nodulan IV	ERRL	unidades	(%)
2	Peso de la colada (Kg.)	1000	1000	-	-
4	Rendimiento Metálico (%)	94,44	94,44	-	-
5	Índice de Rechazo (%)	5,0	5,0	-	-
6	Perdida Metálica (%)	5,5	5,5	-	-
7	Rendimiento Tecnológico General I (%)	84,79	84,79	-	-
8	Productividad (Ton/h)	1,82	1,82	-	-
9	Costo (\$/Ton)	1908,31	1906,93	1,38	0,8
10	Precio (\$/Ton)	2111,03	2109,66	1,37	0,8

En esta tabla se puede apreciar que entre el costo del Nodulan IV, y el costo de la cola ERRL hay una diferencia de 1,38 \$/Ton, generándose una eficiencia de 0,8 %, y entre el precio hay una diferencia de 1,37 \$/Ton y una eficiencia de 0,8 % también, para una mejor competitividad por parte de la cola ERRL.

2.7 Valoración medio ambiental

Con la aplicación de esta instrucción tecnológica el proceso de nolidización es más sostenible porque al recalcular los parámetros tecnológicos se disminuyó el consumo de coque, disminuyendo la generación de desechos sólidos y emisiones gaseosas a la atmósfera, según resultados teóricos.

2.8 Valoración para la defensa de la patria

El objeto social fundamental de la EFAH de Holguín es la producción de fundidos para la Empresa IMPAG “Héroes del 26 de Julio” y la fábrica de combinadas cañeras KTP “60 Aniversario de la Revolución de Octubre” que en la actualidad realizan la reparación y modificación de la técnica militar, donde se utilizaran los fundidos nodulares, una vez puesta en producción esta instrucción.

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos se arriba a las siguientes conclusiones:

- La investigación establece una instrucción tecnológica que permite utilizar la cola de la Empresa René Ramos Latour en la obtención de nodulizante para la producción de hierro de alta resistencia de una forma más competitiva y sostenible.
- Se establece como aporte novedoso que por primera vez se utiliza la cola de la Empresa René Ramos Latour en la obtención de nodulizante, bajo las condiciones específicas de la industria metalúrgica cubana.

RECOMENDACIONES

Continuar con la serie cero de esta tecnología hasta demostrar a escala industrial su competitividad y generalizarla en el resto de las fundiciones del país.

La continuidad de esta investigación para establecer un basamento científico que sustente las conclusiones empíricas de este trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[Abramov, 1983]	Abramov. A. " <u>Manual del joven fundidor</u> ". Editorial Alta Escuela. Moscú. 1983. 203 p.
[Aguirregomescorta, 1995]	Aguirregomescorta P. M. "Utilización del horno de inducción de media frecuencia en las fundiciones modernas". (Thermensa España), I Foro Internacional de Fundición. La Habana, 1995.
[Alexandor, 1998]	Alexandor, N. H. Control del estado del metal Líquido para la obtención de hierro con grafito esferoidal. <i>Liteinoe Proistbostba</i> . N. 3. 1998.
[Bakkerus, 1995]	Bakkerus and Van der Holst. The T-Nock Process for Making Ductil iron. <i>Modern Casting Tech</i> . N. 711, July 1995.
[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". <i>Mundo Mecánico</i> . 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". <i>Mundo Mecánico</i> . 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 "Ind - Mold"". <i>Mundo Mecánico</i> 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"". <i>Ingeniería Mecánica</i> . 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"". <i>Ingeniería Mecánica</i> . N. 3. 2003.
[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 Ind - mold Treatment. <i>British Foundryman</i> . N. 457. 1990.
[Dunks, 1976]	Dunks, C.M. "Mold Nodulizing and Continuous Stream Treatment Techniques as Operated in Europe". <i>Foundry Trade Journal</i> . 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". <i>Liteinoe Proistbostba</i> . N. 2. 1999.
[ILARDUYA,2010]	ILARDUYA. Nodulizantes. Disponible en: http://www.ildarya.com/aditivos.htm [Consulta: 09/12/10]
[ILARDUYA,2011]	ILARDUYA Disponible en: http://www.ildarya.com/ferroaleaciones.htm [Consulta: 04/5/11]
[Karsay, 1992]	Karsay, S. Producción de Hierro Nodular, 2da Edición. Edit. Titanic Inc. Comp. 1992.
[Kobalevich, 1999]	Kobalevich, E. B. Nueva tecnología de obtención de hierro Nodular. <i>Liteinoe Proistbostba</i> . N. 3. 1999. (en ruso).
[LINCE, 2004]	LINCE FUNDICION. Base de Datos en Línea, 2004.Disponible en: http://www.lince-fundición.com [Consulta: 14/03/04]
[Luffe, 1994]	Luffe, A. "Modificación del hierro con grafito esferoidal en el molde". <i>Liteinoe Proistbostba</i> . N. 12. 1994. (en ruso).
[Oña, 1998]	Oña. A. y otros. Fabricación de acero en hornos eléctricos de arco (H.E.A). Evaluación del consumo energético. 1992-1996. DYNA, junio 1998.
[Peter E,2010]	Colaborado por Peter E. para <u>arquitectura y construcción</u> ARQHYS. Disponible en: http://www.arqhys.com/contenidos/hierro-produccion.html [Consulta: 09/12/10]
[Prosid,1999]	Prosid. Información sobre uso de hornos eléctricos. Puebla, México, 1999.
[Ramírez,	Ramírez A.M. y L. Trápaga M."Simulación de un horno

Trápaga ,2001]	eléctrico de arco CC para aceración, estudio de la región del arco y del baño metálico”. –Revista <i>Metalurgia</i> , p 445 – 458. Madrid 37, mayo – junio 2001.
[Saavedra, Viloría,2010] ^a	Saavedra, Ing. Alexander y M. Ing. Alexander E. Viloría. Fundición Esferoidal. Disponible en: http://www.buenastareas.com/ensayos/FundicionEsferoidal/130382.html . inf: info@alexandersaavedra.com [Consulta: 09/12/10]
[Saavedra, Viloría,2010] ^b	Saavedra, Ing. Alexander y M. Ing. Alexander E. Viloría. Fundición Esferoidal. Disponible en: http://www.angelfire.com/al3/mambuscay/Art3.htm(13/5/2011) 21:51pm inf: info@alexandersaavedra.com [Consulta: 09/12/10]
[Sánchez,2002]	Perfil Fundición de Acero-Hierro de Holguín. Convención Internacional de la Industria Metalmeccánica METANICA. . CD-ISSN 1607-6261
[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 Master en Diseño y Fabricación Asistido por Computadora para La Metal-Mecánica. Holguín 2007.
[Sánchez ^b ,2007]	El Rendimiento Tecnológico General como Regulador del costo de las piezas fundidas de hierro nodular. Resumen III Conferencia Internacional. Ingeniería. 2007
[Sánchez ^c ,2007]	El Rendimiento Tecnológico General como Regulador del costo de las piezas fundidas de metales ferrosos y no ferrosos. Convención Internacional de la Industria Metalmeccánica. METANICA. CD-ISSN 1607-6261
[Sánchez,2007] ^d	Horno Multipropósito. Convención Internacional de la Industria Metalmeccánica. METANICA. CD-ISSN 1607-6261
[Sánchez ^e ,2007]	Sistema de trabajo 20 X 10. Convención Internacional de la Industria Metalmeccánica. METANICA. CD-ISSN 1607-6261
[Sánchez,2008]	Entorno tecnológico alternativo para la producción competitiva, sostenible y sustentable de fundidos de cuproaleaciones densos. Jornada Científica.

	Facing – CEDEMA. 2008
[Sánchez ^a ,2009]	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]	Caculo 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]	Ahorro de portadores energéticos en la obtención de fundidos no ferrosos bajo las condiciones específicas de la industria metalúrgica cubana. Memorias del 6to. Taller Internacional de Energía y Medio Ambiente CD – ROOM-ISBN: 978- 959-257- 231- 7
[Suárez,2004]	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: 09/12/10]
[Tartera, 2002]	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: 24/11/02]