



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**“FABRICACIÓN DE UN HIERRO NODULAR CON FRACCIÓN
CONTROLADA DE CARBUROS”**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**

PRESENTA:

JONATHAN CATALÁN CALDERÓN



México, D.F.

2010



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Profesor: I.Q.M. Cándido Eusebio Atlatenco Tlapanco

VOCAL: Profesor: Dr. Carlos Gonzales Rivera

SECRETARIO: Profesor: Dr. José Alejandro García Hinojosa

1er. SUPLENTE: Profesor: I.Q.M. Arturo Alejandro Sánchez Santiago

2° SUPLENTE: Profesor: I.Q.M. Jorge Sergio Téllez Martínez

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: FACULTAD DE QUÍMICA EDIFICIO "D"
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA

ASESOR DEL TEMA: DR. JOSÉ ALEJANDRO GARCÍA HINOJOSA

(nombre y firma)

SUPERVISOR TÉCNICO (Si lo hay): M. EN. I. ADRIAN MANUEL AMARO VILLEDA

(nombre y firma)

SUSTENTANTE (S): JONATHAN CATALÁN CALDERÓN

(nombre (s) y firma (s))

AGRADECIMIENTOS

A mis padres,

Teodoro Catalán Sánchez, Humbertina Calderón Calderón

Por darme su apoyo incondicional, en especial a mi madre por ser la persona que siempre se encontró al lado mío en los momentos difíciles.

A mis abuelos.

Pablo Calderón, Dolores Calderón, Ágape Catalán y Petra Sánchez

Por todos los consejos que me brindaron en cada momento de la vida.

A mi hermana.

Ana Guadalupe Catalán Calderón

Por todo los momentos en los que hemos estado juntos y por ser una parte importante de mi vida.

A mis primos.

Alberto Carlos, Valentín, Isaías, Orlando Valencia, Zenón, José Luis.

Por todos los momentos inolvidables en los que nos hemos divertido juntos y nos hemos apoyado incondicionalmente, por cierto quién no recuerda lo que nos unió “Estrella Azul”.

A mi familia

Tíos, primos, sobrinos

Los cuales son una parte muy importante de mi vida, los cuales me ayudan en el momento que los necesito.

A mis profesores. Dr. José Alejandro García Hinojosa y M. en I. Adrian Manuel Amaro Villeda, por sus enseñanzas dentro y fuera del salón de clases, observaciones y apoyo para la realización de este trabajo.

A los profesores. I.Q.M Cándido Atlatenco, Dr. Carlos Gonzales, Dr. Marco Aurelio, I.Q.M. Arturo Sánchez, I.Q.M. Ignacio Beltrán, I.Q.M. Juan Manuel de la Rosa, M. en C. Antonio Huerta, por sus enseñanzas y ser parte de mi formación profesional.

A mis amigos y compañeros de la vida.

Diego, José Luis Jesús, Tulio, Pepe, Gilberto, Eduardo Rodríguez, Aldo Cristian, Mauricio, Alberto Flores, Iván, Gerardo, Miguel, Eudoxio, Gerardo S. Hugo, Beto, Alfredo, Fernando, Atahualpa, Felipe y a Caro, Abril, Lilia, Diana Karina, Vero Súchil, Sandra, Lorena, Luz, y Laura, por todos los momentos que pasamos juntos dentro y fuera de clases.

A mis amigos de la facultad.

Luis, Benito, Emmanuel, Zabala, Celinda, Betty Jessica, Diana Camacho, Sandra, Diana, Marisol, Vero, Verito, por todos aquellos momentos que estuvimos juntos.

A Daniela Mondragón, Por su amistad incondicional, por todos los momentos en los que estuvimos juntos, por ser una parte importante en mi vida.

FOREVER “Estrella Azul, Némesis, Mezcalúrgicos y Copilburg Steelers.”

“Más que el brillo de la victoria, nos conmueve la entereza ante la adversidad.”

Gabriel García Márquez.

INDICE

Página

INTRODUCCIÓN

Resumen.	1
Planteamiento del problema.	2
Objetivos.	3

Capítulo I. ANTECEDENTES

1.1 Propiedades de los Hierros colados.	4
1.2 Tipos de hierros fundidos.	4
1.3 Hierros fundidos dúctiles o nodulares.	7
1.4 Fabricación y aplicaciones de hierros CADI.	8
1.5 Ventajas y Desventajas de los hierros CADI.	8

Capítulo II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Procesos de Nodularización.	10
2.1.1 Método del Sándwich.	15
2.2 Diagrama de fases Fe-G y Fe-Fe ₃ C estable y metaestable.	17
2.3 Caracterización de los Hierros colados.	19
2.4 Hierros nodulares.	19
2.4.1 Obtención de los hierros nodulares.	27
2.4.2 Inoculación y post-inoculación.	27
2.4.3 Nodularización.	28
2.4.4 Propiedades mecánicas de los hierros nodulares.	28
2.5 Influencia de los elementos aleantes en el hierro nodular.	29
2.5.1 Elementos que favorecen la grafitización.	32
2.5.2 Elementos que favorecen el blanqueado.	33

2.6 Teoría de formación del grafito nodular.	37
2.6.1 Teoría de la energía superficial.	37
2.6.2 Teoría del crecimiento a través de la capa de austenita.	38
2.7 Velocidad de enfriamiento.	41
Capítulo III. DESARROLLO EXPERIMENTAL	
3. Desarrollo experimental.	43
3.1 Modelo y Molde.	44
3.2 Técnica de fusión para el horno de inducción.	48
3.3 Materiales de carga.	50
3.4 Evaluación microestructural.	53
3.5 Preparación metalográfica.	54
Capítulo IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	
4. Resultados y análisis de resultados.	56
4.1 Resultados de la Primera colada.	56
4.2 Resultados de la segunda colada.	59
4.3 Resultados de la tercera colada.	62
4.4 Observaciones y análisis de resultados.	65
CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS	
Sugerencias	68
Conclusiones.	68
Anexo 1. Balance de carga para la primera colada y su análisis químico.	69
Anexo 2. Balance de carga para la segunda colada y su análisis químico.	76
Anexo 3. Balance de carga para la tercera colada y su análisis químico.	83
Anexo 4. Calculo del modulo de solidificación de la placa y la esfera.	90
Bibliografía.	91

INTRODUCCIÓN

RESUMEN

La resistencia al desgaste por abrasión de un material puede ser mejorada mediante la incorporación a la matriz de una fase dura o de un refuerzo, la cual en aleaciones base hierro está constituida típicamente por carburos. Las mejoras en la resistencia a la abrasión implican, por lo general, una disminución en la resistencia al impacto. En el presente trabajo se estudia el efecto de la adición de aleantes (Cr y Mo) y la velocidad de enfriamiento (En molde arena en verde, carcasa enfriadora de aluminio y carcasa enfriadora de hierro), para lograr la precipitación controlada de carburos en fundiciones nodulares que servirán como base para producir en otro trabajo hierros nodulares austemperizados con carburos sin disolver (CADI). Lo anterior con el fin de obtener materiales que puedan combinar buena resistencia a la abrasión y al impacto. Se realizó una completa caracterización microestructural del material, analizando en particular la distribución y morfología de los carburos.

El contenido general de cada uno de los capítulos de esta tesis experimental, se describe brevemente a continuación.

Capítulo I. Antecedentes, de manera global en este capítulo se encuentra información sobre los trabajos ya realizados acerca de este tema CADI.

Capítulo II. Fundamentos teóricos, se establecen los fundamentos que describen las teorías o hipótesis sobre la formación de carburos en la fabricación del hierro nodular y se muestran los diferentes procesos para la fabricación de hierro nodular, así como ventajas y desventajas de los procesos y en forma conjunta el tipo de nodulizante que emplea cada proceso.

Capítulo III. Desarrollo experimental, en este capítulo se establece el diseño experimental que se llevo a cabo para la fabricación de la pieza experimental de hierro nodular, también se seleccionaron los materiales que se utilizaron, su composición química, la técnica de fusión, el modelo y el molde que se utilizo para la fabricación de la placa y el muestreo para la evaluación microestructural.

Capítulo IV. Resultados y análisis de resultados, en este capítulo se muestran los resultados obtenidos del experimento y su análisis tomando en cuenta los objetivos planteados.

Conclusión, se listan las conclusiones en base a la confrontación de los resultados con los objetivos planteados

Anexos. Se muestran los balances de carga para las tres Coladas y se muestran las composiciones químicas finales obtenidas para cada colada, además se muestra el cálculo completo del modulo de solidificación.

Planteamiento del problema

El hierro nodular juega un papel muy importante en la industria, principalmente en la industria automotriz. Sin embargo el hierro nodular con fracciones controladas de carburos se está empezando a desarrollar con el propósito de ampliar sus aplicaciones, especialmente aquellas que requieren un balance entre dureza y tenacidad. Lo anterior resulta importante en proceso de molienda, maquinaria agrícola, maquinaria para excavación y construcción, entre otras.

De acuerdo con lo anterior es muy importante la fabricación de hierro nodular con fracciones controladas de carburos los cuales sean estables durante el tratamiento de austemperizado para la obtención de hierros CADI, lo cual se pretende alcanzar con los resultados de esta tesis.

Objetivos

- 1.- Determinar el efecto de la adición de aleantes (estabilizadores de carburos o blanqueadores) Cr y Mo y la velocidad de enfriamiento sobre la fracción de carburos formados. Tomando como base la composición nominal de un hierro D-120-90-02.
- 2.- Establecer las condiciones de fabricación hierros colados en horno de inducción con diferentes % de elementos aleantes (0.5%Mo y 0.8% Cr)
- 3.- Determinar en una pieza experimental con modulo de solidificación de 1.27 cm la presencia de carburos
- 4.- Evaluar la fracción presente de carburos en cada pieza y relacionarla con las condiciones experimentales particulares.

CAPITULO I

ANTECEDENTES

1.1 HIERROS COLADOS. ⁽¹⁾

Propiedades generales. Son una familia de aleaciones ferrosas con amplia gama de propiedades y, como su nombre lo indica, se fabrica por procesos de fusión y colada (fundición) para darles la forma deseada. A diferencia de los acero contienen más del 2 %C y de 1 a 4 %Si.

Los hierros fundidos forman excelentes aleaciones para vaciar porque pueden fundirse con relativa facilidad, tienen elevada fluidez y no forman películas superficiales indeseables durante el vaciado. Los hierros fundidos se solidifican con una contracción entre leve y moderada durante la colada y el enfriamiento. Estas aleaciones tienen un alto rango de resistencia y dureza y, en la mayoría de los casos son fáciles de maquinar. Pueden alearse para obtener cualidades superiores en términos de desgaste, abrasión y resistencia a la corrosión. Sin embargo, los hierros fundidos tienen valores de resistencia al impacto y ductilidad relativamente bajos, y esto limita su uso para algunas aplicaciones. La amplia aplicación industrial de los hierros fundidos se debe sobre todo a su costo relativamente bajo y sus versátiles propiedades de ingeniería.

1.2 TIPOS DE HIERROS FUNDIDOS

Se puede distinguir cuatro tipos diferentes de hierros fundidos en base a la forma en que se combina o precipita el carbono en sus microestructuras: hierro blanco, hierro gris, hierro maleable y hierro dúctil o nodular. En la tabla 2 se enlistan los rangos de composición química de los cuatro hierros fundidos básicos y en la tabla 3 se presenta algunas de sus propiedades mecánicas de tensión típicas y sus aplicaciones.

Tabla 1. Rangos de la composición química de hierros fundidos no aleados típicos.

Elemento	Hierro gris (%)	Hierro blanco (%)	Hierro maleable (%)	Hierro dúctil (%)
Carbón	2.5 – 4.0	1.8 – 3.6	2.00 – 2.60	3.0 – 4.0
Silicio	1.0 – 3.0	0.5 – 1.9	1.10 – 1.60	1.8 – 2.8
Manganeso	0.25 – 1.0	0.25 – 0.80	0.20 – 1.00	0.10 – 1.00
Azufre	0.02 – 0.25	0.06 – 0.20	0.04 – 0.18	0.03 máx.
Fósforo	0.05 – 1.0	0.06 – 0.18	0.18 máx.	0.10 máx.

Fuente: C.F Walton (ed), Iron Casting Handbook, Iron Casting Society 1981.

Tabla 2. Propiedades mecánicas típicas y aplicaciones de los hierros fundidos.

Nombre y número de la aleación	Composición química (% en peso)	Estado	Microestructura	Resistencia a la tensión MPa	Límite elástico MPa	Elongación (%)	Aplicaciones típicas
--------------------------------	---------------------------------	--------	-----------------	------------------------------	---------------------	----------------	----------------------

Hierros fundidos grises							
Ferrítica (G2500)	3.4C, 2.2Si, 0.7Mn	Recocido	Matriz Ferrítica	179	-	-	Bloques de cilindros pequeños cabezas de cilindros
Perlítica (G3500)	3.2C 2.0Si 0.7Mn	Fundido tosco	Matriz Perlítica	252	-	-	Bloques de cilindros de camiones y tractores, Cajas de cambio pesadas
Perlítica (G4000)	3.3C 2.2Si 0.7Mn	Fundido tosco	Matriz Perlítica	293	-	-	Forja de motores diesel
Hierros fundidos maleables							
Ferrítica (32510)	2.2 C 1.2Si 0.04Mn	Recocido	Carbono revenido y ferrita	345	224	10	Servicio de ingeniería con buenas propiedades de maquinado
Perlítica (45008)	2.4C 1.4Si 0.75Mn	Recocido	Carbono revenido y perlita	440	310	8	Servicios de ingeniería con tolerancia dimensional específica
Martensítica (M7002)	2.4C 1.4Si 0.75Mn	Templado y revenido	Martensita revenida	621	438	2	Partes de alta resistencia bielas y horquillas de juntas universales
Hierros fundidos dúctiles							
Ferrítica (60-40-18)	3.5C 2.2Si	Recocido	Ferrítica	414	276	18	Coladas a presión, como cuerpos de válvulas y bombas
Perlítica (80-55-06)	3.5C 2.2Si	Fundido tosco	Ferrítica Perlítica	552	379	6	Cigüeñales engranajes y rodillos
Martensítica (120-90-02)	3.5C 2.2Si	Martensítica	Templada y revenida	828	621	2	Piñones engranajes rodillos y tapas corredizas

Fuente: C.F Walton (ed), Iron Casting Handbook, Iron Casting Society 1981.

1.3 Hierros fundidos dúctiles o nodulares (grafiesferoidales)

El hierro fundido dúctil (llamado a veces hierro colado nodular o esferulítico) combina las siguientes propiedades: tiene buena fluidez y moldeabilidad, excelentes cualidades de maquinado y buena resistencia al desgaste. Además, el hierro fundido dúctil tiene varias propiedades similares a las del acero, como

alta resistencia, tenacidad, ductilidad y posibilidad de ser trabajado en caliente y endurecido.

Los esferoides se forman durante la solidificación asociado a que los niveles de azufre y de oxígeno del hierro se han reducido a niveles muy bajos mediante la adición de magnesio al metal inmediatamente antes de colarlo. El magnesio reacciona con el azufre y el oxígeno, por lo cual estos elementos no pueden interferir con la formación de los esferoides de grafito.

Formación de carburos. ⁽²⁾

El hierro dúctil se obtiene a partir de hierro líquido bajo en azufre (0.015 % máx.) y ser tratado con magnesio y/o tierras raras para obtener grafito esferoidal. El control de la matriz se realiza mediante diversos métodos, como son la adición de aleantes y la velocidad de enfriamiento. Para el caso de la formación de carburos ambos métodos aplican, siendo de mayor efecto la adición de estabilizadores de carburos o elementos blanqueadores como lo son el cromo, molibdeno, titanio, vanadio, el propio manganeso, entre otros. El efecto de los elementos formadores de carburos y la velocidad de enfriamiento se explicaran con detalle en el capítulo 2 de fundamentos Teóricos.

En forma general para el caso de la velocidad de enfriamiento, cuando esta es lo suficientemente alta puede originar carburos incluso sin la presencia de elementos formadores de carburos, estos generalmente se presentan en la superficie de la pieza, y puede disminuir la fracción presente en la parte central de la pieza cuando esta es de sección gruesa.

1.4 FABRICACIÓN DE HIERROS CADI Y APLICACIONES POTENCIALES DE LOS HIERROS CADI. ⁽²⁾

Para la fabricación de los hierros CADI se requiere un hierro nodular con un porcentaje mínimo de entre 45 y 65% de carburos para poder realizar el tratamiento isotérmico y poder mejorar las propiedades de resistencia al desgaste.

En los últimos años se ha dado un énfasis especial a desarrollar nuevas aplicaciones de los hierros nodulares, esto se ha logrado mediante los estudios con hierros ADI, del cual ya se tienen una elevada demanda de piezas de hierro nodular con tratamiento de austemperizado. La última etapa de evolución de los hierros nodulares son los hierros CADI, en el que sus propiedades de alta resistencia al desgaste combinadas con la tenacidad de la matriz ausferrítica, los hacen un material muy competitivo contra algunos aceros aleados con tratamiento térmico de temple. Una característica fundamental antes de la fabricación del hierro CADI, es la obtención del hierro nodular con carburos (CNI carbide nodular iron), los cuales tengan fracciones controladas en la matriz y además posean la suficiente estabilidad para no disolverse durante el tratamiento de austemperizado.

Las aplicaciones recientes y potenciales de los hierros CADI incluyen para la agricultura: Dientes, arados, placas de desgaste, recolectores, componentes de máquinas cosechadoras. Aplicaciones para ferrocarril son contacto de la suspensión. En la construcción y la minería se incluye componentes de excavadoras, dientes escarificadores, cortadores, molino de martillos, cubiertas, rampas, platos, cajas, tubos de transporte, codos, trituradora de rodillos y rodillos. Aplicaciones industriales de carácter general son componentes de bombas, placas de desgaste de viviendas, patines, rodillos.

1.5 Las principales ventajas y desventajas del CADI son:

VENTAJAS

- 1.-Es más resistente al desgaste que el Grado 5 ADI y que algunos aceros templados
- 2.-Es menos caro en comparación con el hierro blanco con 18 %Cr utilizado en componentes que demandan elevada resistencia al desgaste.
- 3.-No se requiere inversión de capital para obtener el hierro nodular con carburos para posteriormente obtener el CADI

DESVENTAJAS

- 1.-Tienen limitada maquinabilidad

2.-El costo puede incrementarse cuando el hierro base ADI se fabrica mediante la adición de aleantes caros, como el molibdeno.

3.- Control estricto del tratamiento de austemperizado para no disolver los carburos

De lo anterior se observa que la publicación de trabajos de investigación enfocados a la producción de hierros nodulares con carburos como material base para la fabricación de CADI's es muy limitada, debido al reciente desarrollo de este material.

CAPITULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS ⁽³⁾

De acuerdo con la literatura, para la fabricación de hierro nodular es necesario realizar un tratamiento al metal líquido (nodularización), el cual consiste en agregar elementos que promuevan la esferoidización del carbono libre (grafito) como: magnesio, cerio y elementos de la familia de tierras raras. Por lo que el elemento más empleado como agente nodulizante dentro de la industria es el magnesio cuya presentación es de forma de ferro-silicio-magnesio (Fe-Si-x Mg, donde x=%).

El magnesio contenido dentro de la ferroaleación al momento de agregarlo en el baño se puede perder por volatilización, oxidación y combinación con el azufre, en el primer caso debido a que la temperatura de ebullición del magnesio (1170 °C) es bajo comparado con la temperatura de trabajo durante la fusión (1350 °C -1400 °C), en el segundo caso va a depender mucho de formación del óxido de magnesio que está en función de la cantidad de oxígeno (presente en el metal líquido y en el ambiente) y también el método de nodularización empleado. En el tercer caso va a depender considerablemente del porcentaje de azufre contenido en el metal líquido por lo que se recomienda que el azufre no exceda de 0.03% debido a que el magnesio reacciona con el azufre en la misma proporción (1:1), lo cual trae como consecuencia una mayor cantidad de nodulizante a utilizar en el tratamiento, traduciéndose en costos de proceso.

2.1 PROCESOS DE NODULARIZACIÓN. ⁽⁴⁾

Los procesos de nodularización se clasifican en 5 grupos:

Grupo 1: Esta conformado por los procesos que utilizan como medio de tratamiento de nodularización la olla, los cuales se dividen a su vez en:

a.- Métodos de la olla abierta.

1. - Sándwich.
2. - Olla abierta.

3. - Trigger.
 4. - Tapón poroso.
- b.- Métodos de olla con cubierta removible.

- 1.- Olla con tundish.
2. - Campana de inmersión.
3. - Pot a mousson o MAP.

c.- Métodos de olla con cubierta fija.

1. - Método UPO.
2. – Método de la Tetera.

Grupo II: Pertencen a los llamados continuos o semicontinuos, la nodularización se lleva a cabo en el chorro de vaciado del horno y se divide en:

a. – Nodularizante en estado sólido.

1. – Método Flow-trough.
2. – Método Flo tret.
3. – Método del Alambre.

b. – Nodulizante a granel.

1. – T-Nock

Grupo III: Comprende a los procesos que se realizan dentro del molde (In Mold), se divide en:

a.- En el molde (In Mold).

1. – Nodularizante granular.
2. – Nodularizante sólido.
3. – Nodularizante sinterizado.

Grupo IV: Se encuentran los procesos que emplean convertidores, de los cuales se tienen:

a.- Convertidores:

1. –Convertidor Fisher.
2. – Convertidor Foseco.

Grupo V: Comprende a los procesos en los cuales el sistema es presurizado, estos procesos utilizan magnesio metálico y se divide en:

a.- Sistemas a presión.

1. – Cámara presurizada.
2. – Inyección con lanza.

En las tablas 3, 4 y 5 se resumen las principales ventajas y desventajas de los procesos que utilizan como medio de tratamiento de nodularización en la olla:

Tabla 3. Métodos de la olla abierta. ⁽⁴⁾

Método	Ventajas	Desventajas
--------	----------	-------------

Sándwich.	1.- Bajo costo de inversión 2.- Flexibilidad	1.- la eficiencia de este proceso es muy baja en el orden de un 45% para la recuperación de magnesio dentro del metal. 2.- Genera una gran cantidad de humos que contaminan el ambiente. 3.- Se debe dar un sobrecalentamiento al metal para evitar que se enfríe por el contacto con la masa del nodulizante, sin embargo si la temperatura del baño es alta la recuperación es menor.
Olla abierta	1.- Este proceso no requiere instalaciones costosas.	1.- Se genera una gran cantidad de humos provocados por la oxidación del magnesio, MgO. 2.-Es inseguro debido a que la reacción del magnesio con el metal es extremadamente violenta. 3.- Es un proceso muy ineficiente, debido a que tiene una baja recuperación del magnesio residual.
Trigger	1.-Menor cantidad de humos generados. 2.- Menor cantidad de salpicaduras. 3.- Mayor recuperación del magnesio debido a la presión metalostática sobre el nodulizante.	1.- El carburo de calcio es más costoso que el acero. 2.- El rendimiento esta alrededor del 50% en la recuperación del magnesio
Tapón poroso	1.- Permite el tratamiento de nodularización inmediatamente después de desulfurar. 2.- Se puede tratar metal líquido con alto contenido de azufre.	1.- Alto costo y mantenimiento del equipo usado. 2.- Perdidas de temperatura al meter un gas a menor temperatura. 3.- El tamaño de la partícula y la velocidad de inyección del nodulizante es impórtate para tener resultaos óptimos.

Tabla 4. Métodos de olla con cubierta removible. ⁽⁴⁾

Método	Ventajas	Desventajas

1.- Olla con tundish.	1.- Existe una cantidad menor de oxígeno dentro de la olla por lo que habrá una menor pérdida de magnesio por oxidación. 2.- El tratamiento en la olla cubierta es un método más eficiente aproximadamente es de 60%. 3.- Elimina las salpicaduras y destellos que se originan debido a la reacción del nodulizante.	1.- Mantenimiento a la olla debido a que se acumula escoria. 2.- Control de temperatura de vaciado. 3.- Adecuada inoculación.
2. - Campana de inmersión.	1.- Se puede coleccionar los humos. 2.- Se tienen mecanismos de autocontrol del desplazamiento del pistón.	1.- Pérdida de temperatura debido a la introducción de la campana dentro del metal líquido por lo que se tiene que llevar a cabo un precalentamiento de la campana antes de tener contacto con el metal líquido.
3. - Pot a mousson o MAP.	1.- Bajo costo. 2.- Mínima formación de escoria. 3.- Simplicidad y flexibilidad.	1.- Pérdida de temperatura debido a la introducción de la campana dentro del metal líquido.

Tabla 5. Métodos de olla con cubierta fija. ⁽⁴⁾

Método	Ventajas	Desventajas

Método UPO.	1.- Eliminación de humos, destellos y salpicaduras. 2.- El cambio total de refractario se hace cada 1000 tratamientos.	1.- Control de la temperatura.
Tetera	1.- Buena recuperación de magnesio. 2.- Eliminación de humos destellos y salpicaduras.	1.- Se debe transferir el metal que recibió el tratamiento a una olla de colada, debido a que el metal se quedo en el pico de la tetera no alcanza a tener el tratamiento.

2.1.1 Método del Sándwich el cual se utilizo para realizar el experimento.

(5,6)

Se derivó a partir del método de adición simple. Con el fin de reducir la pérdida de magnesio por oxidación, dentro de la olla existe un pequeño desnivel en el cual se coloca el agente nodulizante (Noduloy), que es recubierta con rebaba de acero y se compacta perfectamente para retrasar la reacción de oxidación del magnesio, la cubierta de acero no debe contener cantidades significativas de cromo, titanio, zirconio, vanadio y tungsteno ya que estos son contrarios al efecto buscando de grafitización, además de estos elementos también se debe de evitar elementos contaminantes como el plomo, estaño, antimonio y cadmio los cuales tienen un efecto perjudicial sobre la forma y tamaño final del grafito.

Es recomendable utilizar para este método de ferro-aleaciones con bajos contenidos de magnesio o con aditivos como cerio que incrementa el efecto nodularizador, disminuye la reactividad del magnesio disminuye la cantidad de humos producidos y se incrementa la recuperación del magnesio.

La olla presenta ciertas características como son la relación altura: diámetro que se encuentra desde 1.5: 1 hasta 3: 1, el desnivel donde se coloca el agente nodulizante debe tener un ancho = $\text{diámetro}/3$ y la altura = $\text{diámetro}/6$, el diámetro se toma del fondo de la olla como se muestra en la figura 1.

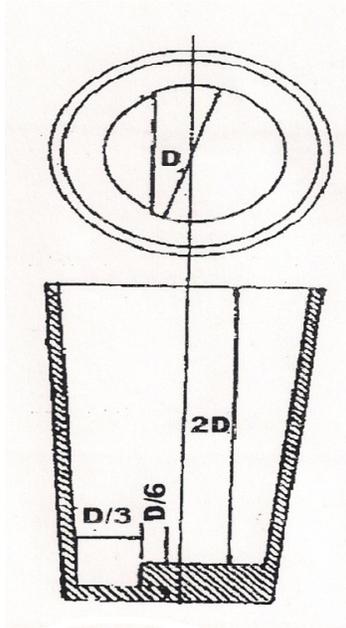


Figura 1. Olla utilizada en el método del sándwich, el diámetro del disco de acero cubre al noduloy par retarda la reacción.

Sus principales ventajas

- 1.- Bajo costo de inversión
- 2.- Flexibilidad

Y sus desventajas son:

- 1.- La eficiencia de este proceso es muy baja en el orden de un 45% para la recuperación de magnesio dentro del metal.
- 2.- Genera una gran cantidad de humos que contaminan el ambiente.
- 3.- Se debe dar un sobrecalentamiento al metal para evitar que se enfríe por el contacto con la masa del nodulizante, sin embargo si la temperatura del baño es alta la recuperación es menor.

2.2 Diagrama de fases Hierro-Grafito (metaestable y estable)

En la figura se representa el diagrama de fases del sistema binario Fe- Fe₃C para contenidos altos de carbono. El hierro sufre cambios estructurales con la

temperatura antes de fundir. A temperatura ambiente la forma estable es la ferrita o Fe- α . A 912 °C la ferrita sufre una transformación polimórfica a austenita o Fe- γ . La austenita se transforma a otra fase a 1394 °C que se conoce como ferrita- δ , la cual funde a 1538 °C. Todos estos cambios se pueden observar en el eje vertical del diagrama de fases para el hierro puro. El otro eje de la figura, sólo llega al 6.70 % en peso de C, concentración que coincide con el compuesto intermetálicos Fe₃C conocido como carburo de hierro o cementita. La ferrita es relativamente blanda y dúctil. Su estructura es cúbica centrada en el cuerpo, ferromagnética por debajo de 768 °C, y de densidad 7.88 g/cc. La austenita es la más dúctil de las fases del diagrama Fe-Fe₃C, su estructura es cúbica centrada en las caras. Esta fase permite un proceso de difusión con el carbono mucho más rápido, tiene una solubilidad máxima de carbono del 2.11 % a 1148 °C. Solubilidad aproximadamente 100 veces superior a la de la ferrita. Las transformaciones de fase de la austenita son muy importantes en los tratamientos térmicos de los aceros, en la figura 2 se muestra el sistema Fe-G y Fe₃C.

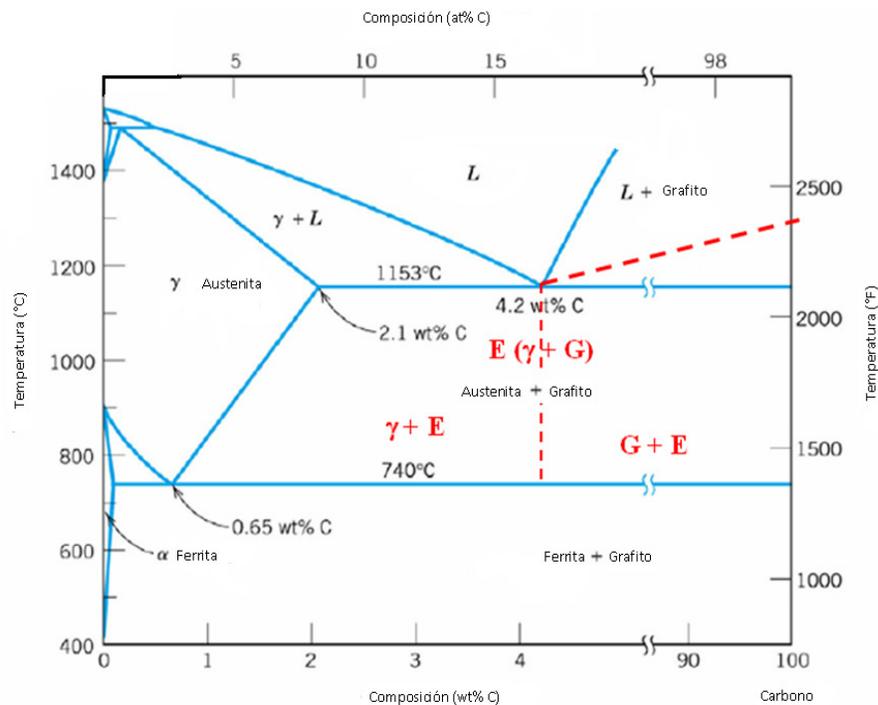


Figura 2. Fuente: C.F Walton (Ed), Iron Casting Handbook, Iron Casting Society 1981.

2.3 Hierros colados

Los hierros colados se diferencian de los aceros por su composición química (contenido de carbono igual o mayor al 2% y contenidos de silicio mayores al 2%), y por sus propiedades tecnológicas en donde su estructura exhibe carbono libre o grafito. Dependiendo del potencial de nucleación que tiene relación con el tipo de tratamiento que se le efectúe al metal líquido, composición química y velocidad de enfriamiento, la solidificación de los hierros colados de acuerdo con la termodinámica, puede seguir dos tipos de sistemas, el sistema meta-estable que sigue un comportamiento del diagrama Fe-Fe₃C y el sistema estable en el cual la solidificación sigue un comportamiento del diagrama Fe-Grafito.

El potencial de nucleación del líquido y la composición química determinan el potencial de grafitización del hierro. Un alto potencial de grafitización trae como resultado la formación de grafito (carbono libre) y lo contrario favorece la formación en el hierro colado la ledeburita.

2.4 Caracterización de hierros nodulares

Con la ayuda de la metalografía y con el aumento en los conocimientos de las fundiciones, la clasificación del grafito de acuerdo a su forma es la siguiente: grafito laminar u hojuela (FG), grafito esferoidal (SG), grafito compacto o vermicular (CG) y grafito maleabilizado (TG), la cual se observa en la figura 3 y la tabla 6, de acuerdo a la norma ASTM A-247.

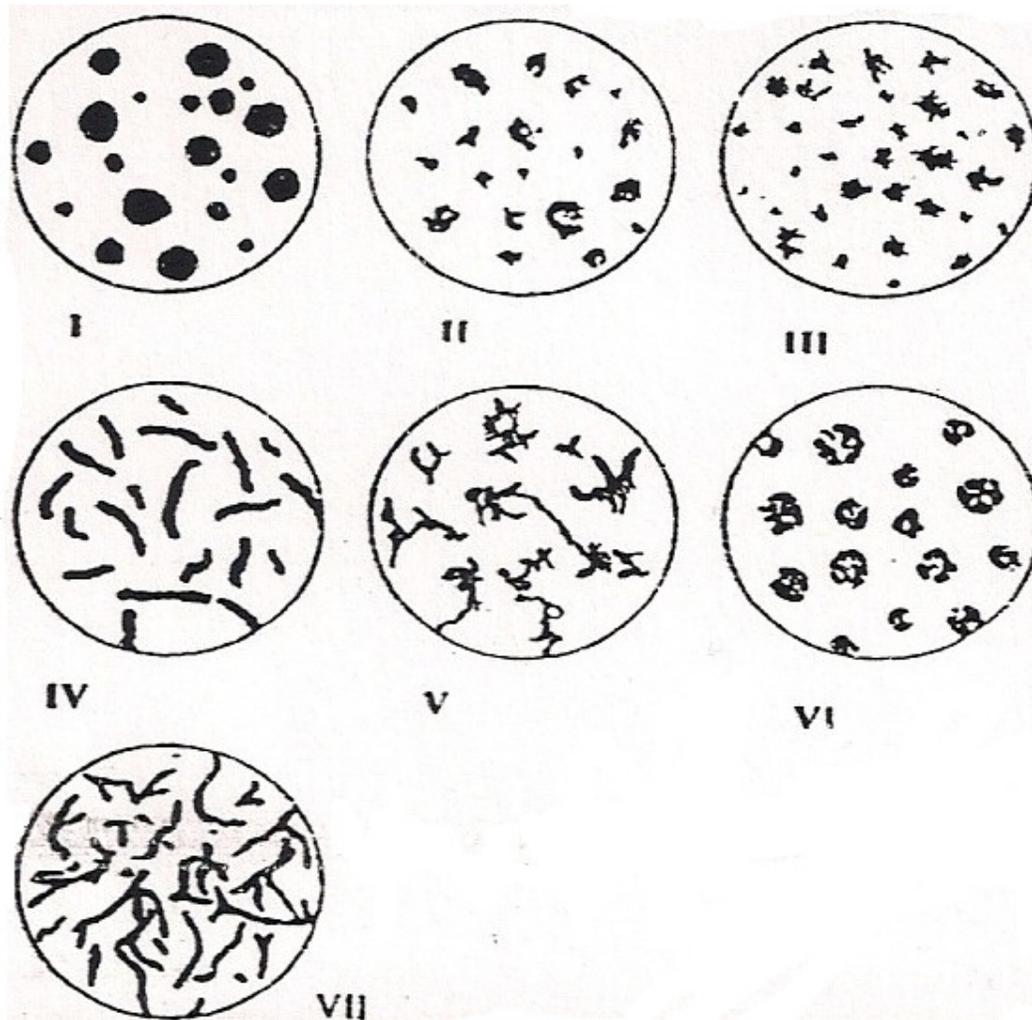


Figura 3. Formas del grafito para clasificar a los hierros fundidos.

Tabla 6. La clasificación anterior de la morfología del grafito se describe en la siguiente tabla.

ASTM A-247	EQUIVALENCIA EN ISO/R 945-1969(E)	DESCRIPCIÓN
I	VI	Grafito esferoidal
II	VI	Grafito esferoidal imperfectamente formado
III	IV	Grafito Maleabilizado
IV	III	Grafito compacto
V	II	Grafito en forma de cangrejo
VI	V	Nódulos en forma de irregular abierta

Tamaño	Dimensión máxima (mm)X100
--------	---------------------------------

VII	I	Grafito en forma de hojuela
-----	---	-----------------------------

También se presentan patrones para evaluar las características de los nódulos de grafito como son: % de nodularidad, tamaño de nódulo y densidad de nódulos, se muestran en las figuras 4, 5 y 6. Adicionalmente se propusieron patrones (FOUNDRYMENS GUIDE TO DUCTILE IRON MICROSTRUCTURES, AFS 1984) para evaluar el % de las fases que constituyen la matriz, como son la perlita y la ferrita, incluyendo el % de carburos, esto se muestra en las figuras 7 y 8.

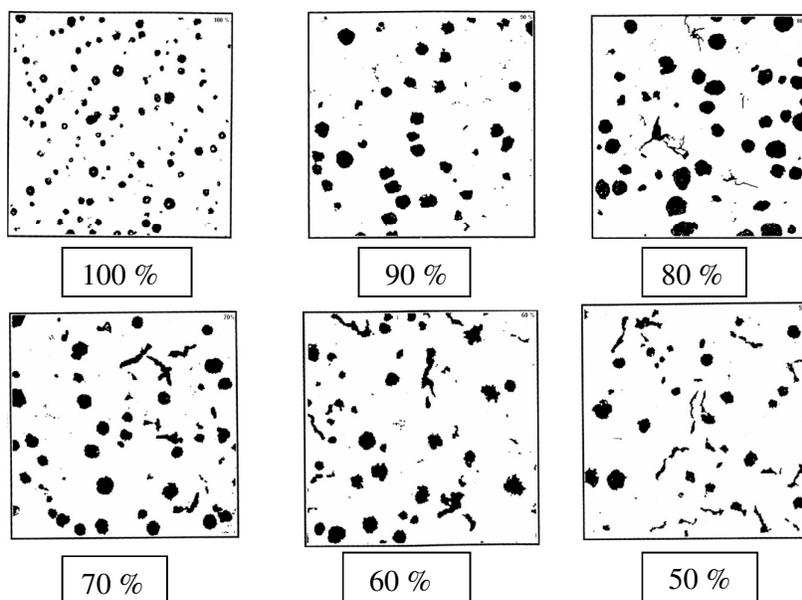
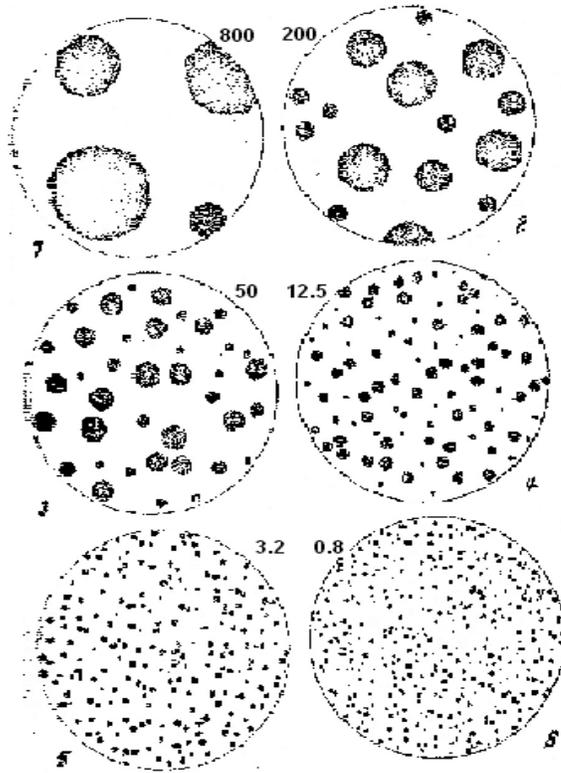


Figura 4. Patrón para evaluar el % de Nodularidad (100x)



1	128
2	64
3	32
4	16
5	8
6	4
7	2
8	1

Figura 5. Patrón para evaluar el tamaño de nódulo

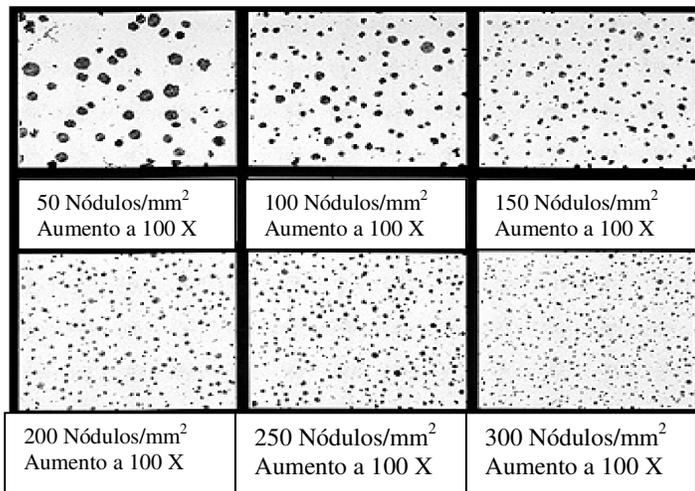


Figura 6. Patrón para evaluar la densidad de nódulos

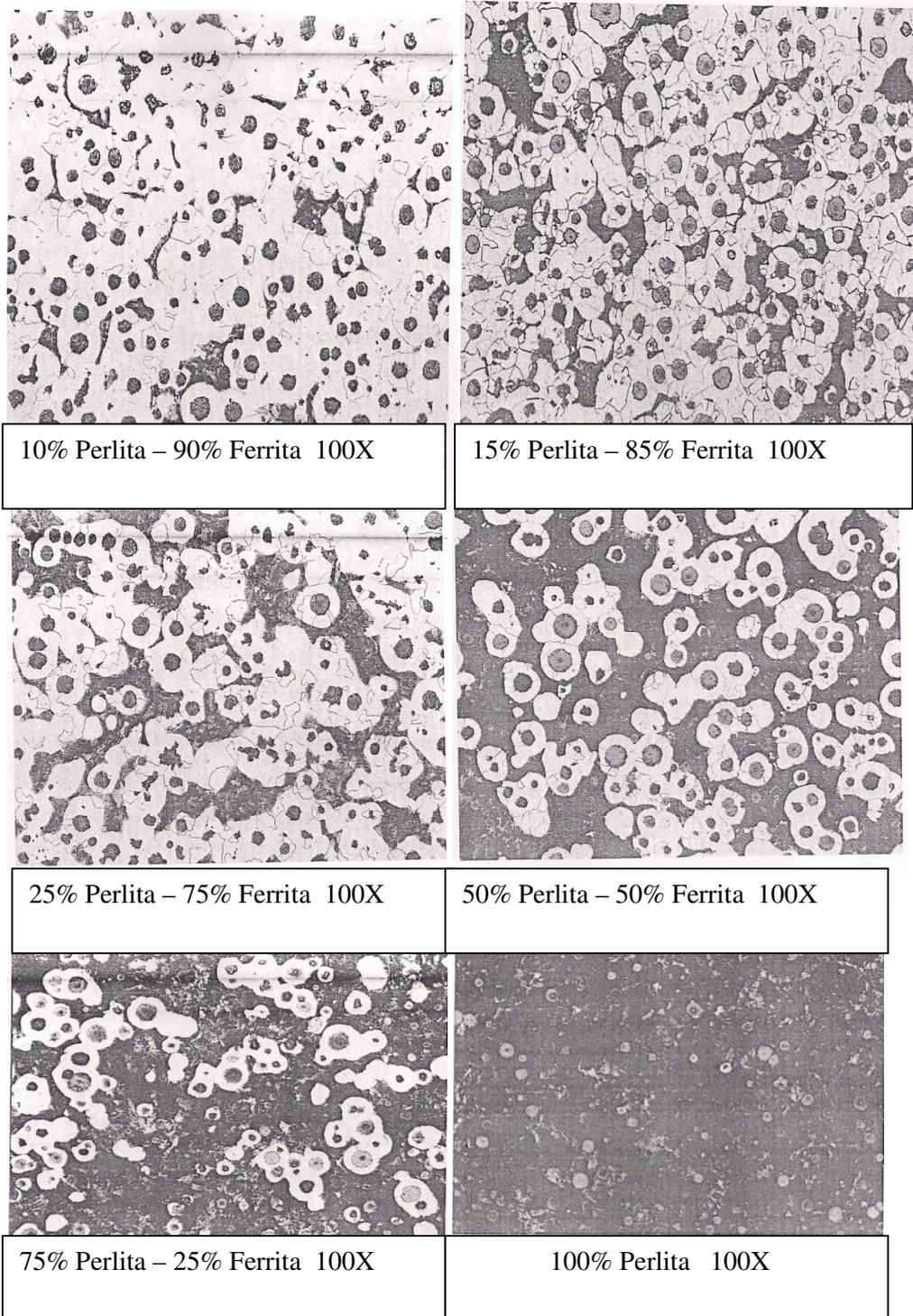
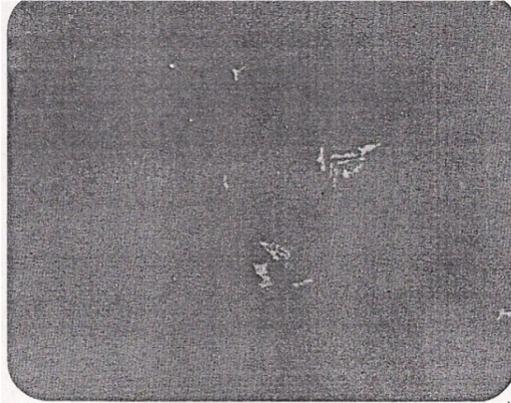


Figura 7. Patrón comparativo propuesto por la AFS para evaluar el % de ferrita y perlita en la matriz de hierros colados.



Ataque con Nital



Ataque con Persulfato de amonio

1 % Carburos 100X

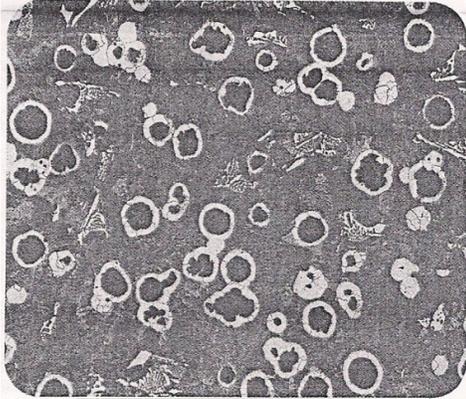


Ataque con Nital

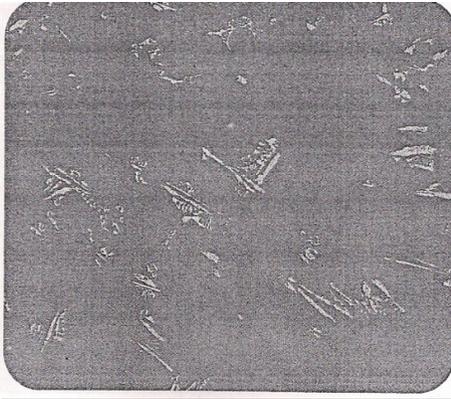


Ataque con Persulfato de amonio

2 % Carburos 100X

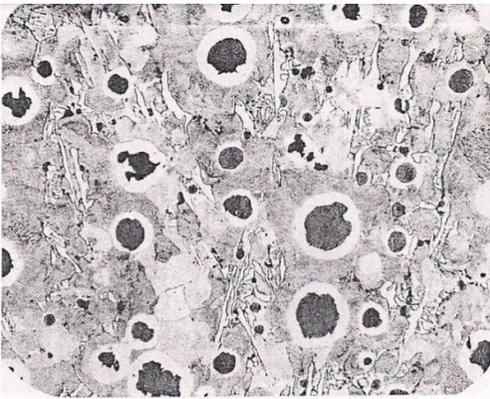


Ataque con Nital



Ataque con Persulfato de amonio

5 % Carburos 100X

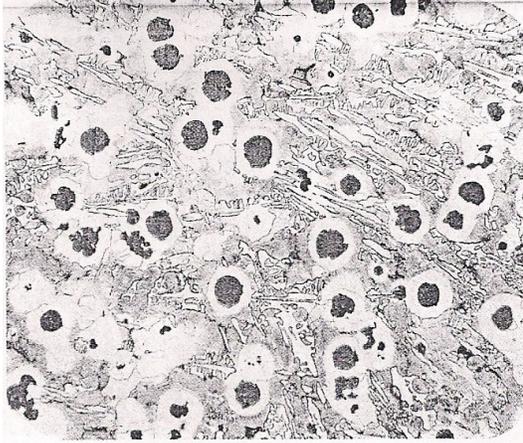


Ataque con Nital

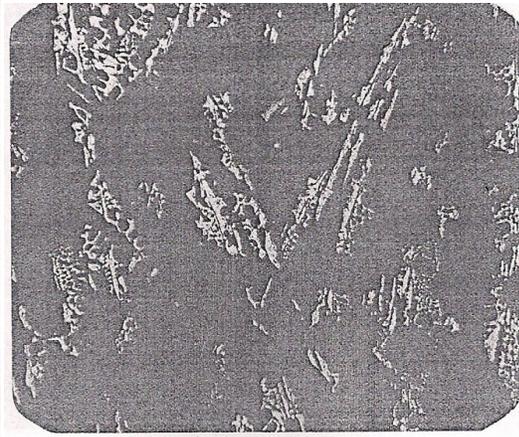


Ataque con Persulfato de amonio

10 % Carburos 100X

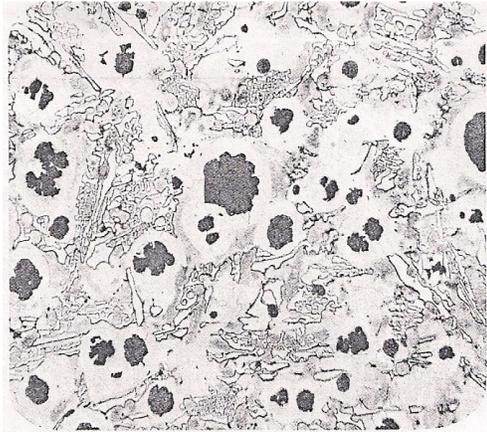


Ataque con Nital

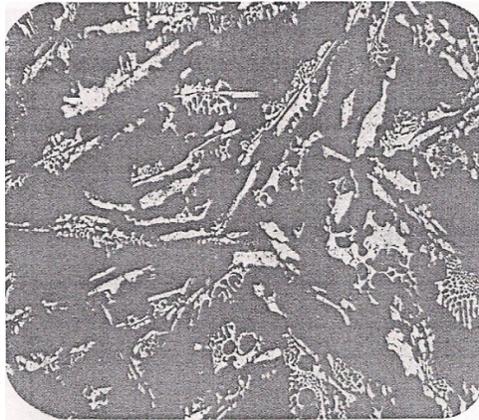


Ataque con Persulfato de amonio

15 % Carburos 100X



Ataque con Nital



Ataque con Persulfato de amonio

20 % Carburos 100X

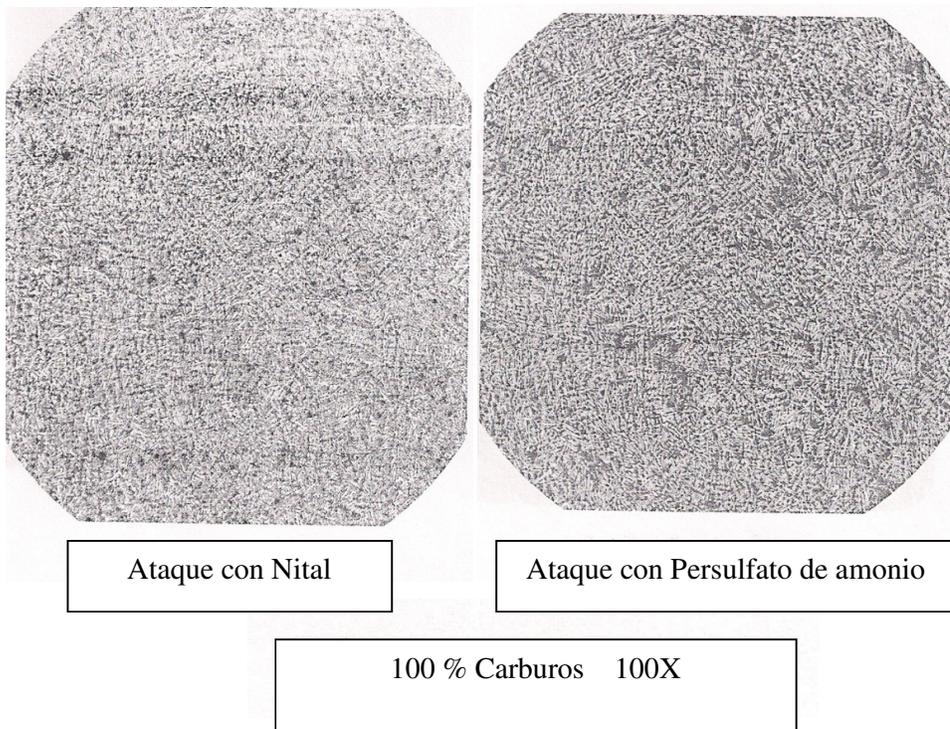
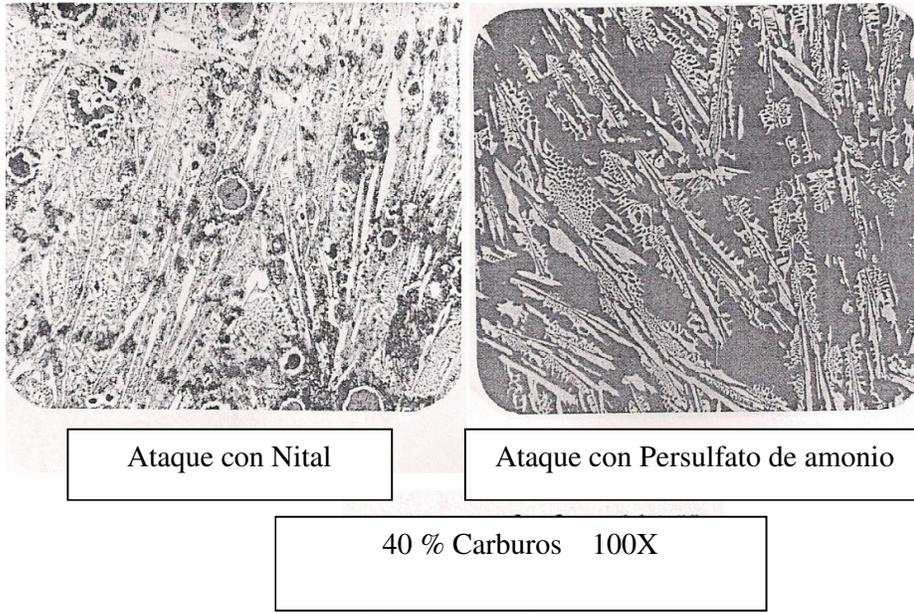


Figura 8. Patrón comparativo propuesto por AFS para evaluar el % de carburos.

2.4.1 Obtención del hierro nodular.

El hierro nodular se define como una aleación base hierro con alto contenido de carbono, en la que el grafito está presente en la forma de esferoides o nódulos y no en forma de hojuelas lo cual es característica principal de un hierro gris.

Este carbono contenido dentro del hierro se puede presentar de dos formas:

1.- Carbono combinado: el cual se encuentra depositado dentro de la cementita (Fe_3C).

2.- Carbono libre: precipitado en forma de esferoides.

Para la obtención del hierro nodular se tiene que llevar a cabo tres tratamientos al metal líquido que consta una inoculación, nodularización y post inoculación, que son descritos en los siguientes párrafos

2.4.2 Inoculación y post- inoculación

Desde el punto de vista microscópico y metalúrgico la inoculación puede considerarse como una nucleación heterogénea, es decir, es el proceso de agregar núcleos artificiales con el fin de producir una solidificación eutéctica, precipitando grafito con un mínimo de subenfriamiento.

Los hierros son inoculados por varias razones, la primera razón es controlar el subenfriamiento de zonas de piezas que solidifican rápido, de paredes delgadas y largas puntas, mejora la resistencia de la tracción aunque decrece con el aumento del carbono equivalente.

Los tipos de inoculantes son de tipo grafito o ferrosilicio, aunque el más empleado es el ferrosilicio y los niveles de silicio que se utilizan son 50 o 75%, además incluye elementos como aluminio, bario, calcio, cerio u otras tierras raras, estroncio, titanio y circonio en porcentajes bajos.

En el caso del hierro nodular la inoculación sirve para obtener principalmente una alta densidad de esferoides y la post-inoculación se utiliza para el mismo objetivo.

2.4.3 Nodularización

En la producción del hierro nodular es importante el control de los agentes contaminantes perjudiciales, por otro lado cuando se efectuó el tratamiento de nodularización es necesario mantener el azufre por debajo del 0.02%, esto se requiere para no hacer costoso el proceso y además conlleva otras implicaciones entre ellas formaciones altas de sulfuros que perjudican las características tecnológicas del metal al vaciarse (fluidez, inclusiones, etc.).

El tratamiento de nodularización consiste en agregar (magnesio, aleaciones de magnesio y algunas veces elementos de la familia de las tierras raras por ejemplo el cerio), al metal líquido de manera que el carbono libre precipitado se encuentre como el grafito en forma de esferoides (nódulos).

2.4.4 Propiedades Mecánicas de los hierros nodulares.

Las propiedades mecánicas de los hierros nodulares va a depender de:

- 1.- Tipo de matriz
- 2.- Forma y tamaño del nódulo de grafito formado.

La gran mayoría de los hierros nodulares son usados en las condiciones de colada, sin embargo en ocasiones se requiere incrementar las propiedades mecánicas esto se puede lograr dándole un tratamiento térmico a las piezas coladas.

En la actualidad existe un mayor interés en mejorar las propiedades mecánicas del hierro nodular por medio del tratamiento térmico de ADI (Hierro Dúctil Austemperizado), el cual presenta una estructura acicular y austenita estabilizada, la microestructura obtenida tiene una gran combinación entre resistencia y ductilidad.

El hierro nodular para ADI para mejorar resistencia y la penetración del tratamiento térmico debe de ser aleado con pequeñas cantidades de níquel, molibdeno o cobre.

2.5 Influencia de los elementos de la composición química en el hierro nodular ⁽²⁶⁾

Muchos de los elementos presentes en el hierro nodular han sido clasificados por tener influencia sobre la microestructura, los clasifica en gamágenos, alfágenos y formadores de carburos.

Gamágenos: Ni, Mn y Cu

Alfágenos: Si, Al y Mo

Formadores de carburos: Cr, Mo, Mn y V

El efecto detallado se describe a continuación

Apraiz reporta una tabla comparativa en la cual resume el efecto de cada elemento aleante en los hierros colados, esta se muestra en la tablas 7 y 8. Esta el número entre paréntesis indica el poder grafitizante (signo positivo) o el poder de blanqueo del elemento (signo negativo).

Tabla 7. Influencia de los elementos de aleación en las fundiciones.

Elemento	Coef. de grafitización	Efecto sobre carburos a alta Tem.	Efecto sobre el grafito	Efecto sobre la perlita	% de adición
C	Favorece	Decrece	Engrosa	Decrece Fuerte	-

Si	Favorece (+1)	Decrece	Engrosa	Decrece Fuerte	-
Al	Favorece (+0.5)	Decrece	Engrosa	Decrece Fuerte	0 – 2%
Ti	Favorece (+0.4)	Decrece	Afina la Fuerte	Decrece	0.1 – 0.2%
Ni	Favorece (+0.35)	Decrece ligero	Afina ligero	Decrece	0.5 – 3%
Cu	Favorece (+0.2)	Indiferente	Indiferente	Decrece Ligero	0 – 3%
Mn	Opone (-0.25)	Estabilizada	Afina ligero	Aumenta	0.8 – 1.5%
Mo	Opone (-0.3)	Indiferente	Afina fuerte	Aumenta Ligero	0.8 – 1.5%
Cr	Opone (-1)	Estabiliza Fuerte	Afina ligero	Aumenta	-
V	Opone (-1.5)	Estabiliza Fuerte	Afina	Aumenta	-

Fuente. Apraiz Barreiro Fundiciones. Editorial URMO S.A. Ediciones, Año 1982

Tabla 8. Efecto del Cr, Cu, Mo, Ni, Sn y V en las siguientes propiedades.

Aleante	(Normal) % Max. utilizado	% de incremento en la resistencia	Tendencia al blanqueo	Efecto sobre el grafito	Efecto sobre la perlita
Cr	0.5	20	Fuerte	Refinador mediana	La incrementa
Cu	1.5	10	Débil o negativo	Neutral	La incrementa poco
Mo	1.0	40	Mediano	Refina	Decrece medianamente

Ni	3.0	10	Débil o negativo	Refinador mediano	Decrece medianamente
Sn	0.1	-	Débil	Refinador mediano	Incrementa fuertemente
V	0.35	45	Muy fuerte	Refinador fuerte	Incrementa
Mn	-	-	$F = (\%S)$	Refinador Fuerte	Incrementa $F = (\%S)$
Ti	0.01 - 0.06	-	Incrementa medianamente	Refinador fuerte	Decrece
B	0.0005	-	Incrementa fuertemente	Promueve grafito tipo D	Incrementa
Te	0.005	-	Incrementa medianamente	Promueve grafito tipo D	Incrementa

Fuente. Apraiz Barreiro Fundiciones. Editorial URMO S.A. Ediciones, Año 1982

2.5.1 Elementos que favorece la grafitización. ⁽²⁶⁾

Carbono

El tamaño y número de nódulos de grafito formado durante la solidificación son influenciados por la cantidad de carbono, además del número de núcleos formados durante la práctica de la inoculación. El carbono tiene efecto en la fluidez y de las características de la contracción del metal fundido y debido que durante la solidificación no entra en solución pero si en suspensión, se reduce la fluidez.

La combinación de un alto contenido de carbono (carbono equivalente) y una baja velocidad de enfriamiento resulta que se obtenga grafito flotado y la presencia del grafito degenerado.

Durante la solidificación del hierro nodular, la formación del grafito es acompañada por una expansión de volumen lo cual puede contrarrestar la contracción cuando el hierro pasa de estado líquido al sólido. La cantidad de carbono necesario para contrarrestar la contracción es indicada por el diagrama de Henderson y el valor que se da es: $\%C + \%Si \geq 3.9\%$.

Silicio

Incrementa la elongación, la resistencia al impacto, la dureza y la resistencia a la fatiga. Se considera como un agente grafitizador y promueve la formación de una estructura ferrítica, además disminuye el tamaño de las celdas eutécticas y como resultado se obtiene una disminución de formación de carburos el cual dependerá del tiempo de residencia y de una efectiva inoculación. Junto con el carbono determina el carbón equivalente así como las formas o estructuras del grafito.

Cobre

Es un agente estabilizador de la perlita.

2.5.2 Elementos que favorecen el blanqueado. ⁽²⁶⁾

Manganeso

Es un estabilizador y refinador de la perlita, reduce la ductilidad y la maquinabilidad. La influencia del manganeso sobre la estructura de la matriz es evidente, de manera que si se tiene un bajo contenido de manganeso el tipo de matriz es ferrítica y si el contenido es alto la matriz es perlítica.

Azufre

El porcentaje de azufre dentro del metal no debe excederse al 0.02% ya que de otra manera se tendrá un gasto excesivo de magnesio. Es el principal elemento que se debe tomar en cuenta para que se lleve a cabo la nodularización ya que este reacciona con el magnesio para formar el sulfuro de magnesio (MgS) el cual es antigrafitizante.

Fósforo

La cantidad de fósforo presente en el metal líquido debe ser menor al 0.08% para evitar la formación de esteadita, se considera como estabilizador y refinador de la perlita.

Magnesio

La nodularidad depende de la cantidad de magnesio residual presente en la composición química final.

El aporte de magnesio en el tratamiento consta de varias etapas:

1.- Cuando el magnesio es agregado al metal líquido, actúa como desoxidante y desulfurante del metal en combinación con el oxígeno y el azufre que se encuentra en solución, el resultado de la desoxidación y desulfuración es la producción de óxido de magnesio y sulfuro de magnesio, los cuales presentan baja solubilidad en el metal y baja densidad.

2.- El magnesio es altamente volátil (comparado con la temperatura del tratamiento), su punto de ebullición es de 1170°C, por lo que el contenido de magnesio disminuye con el aumento de la temperatura.

3.- También es excelente modificador de la forma del grafito (magnesio residual), conforme aumenta la cantidad de magnesio en el metal líquido la estructura o forma de grafito sufre cambios pasando primero desde grafito en forma de hojuelas a forma vermicular y finalmente a forma esferoidal. Este cambio que se presenta en la forma de grafito como función del magnesio residual se puede observar en la siguiente figura 12. Si se tiene cantidades

menores a 0.01% el grafito es de forma de hojuelas, en caso de que el magnesio residual se encuentre entre 0.01% y 0.03% la forma de grafito es vermicular, más allá de 0.035% de magnesio residual se encuentra el grafito en forma de esferoides.

Molibdeno

Es usado para incrementar la templabilidad en secciones pesadas en donde se realiza el tratamiento térmico de austempering.

Cromo

Aumenta la profundidad del endurecimiento, es decir de blanqueo o formación de carburos ledeburíticos. Así mismo, aumenta la resistencia a altas temperaturas y evita la corrosión, debido a su capacidad de formar carburos se utiliza en revestimientos o recubrimientos duros de gran resistencia al desgaste, como émbolos, ejes, etc.

En las siguientes figuras 9,10 y 11 se muestra el comportamiento de los elementos aleantes al blanqueo, los grafitizantes y también se muestra el desplazamiento de la temperatura eutéctica según el elemento aleante.

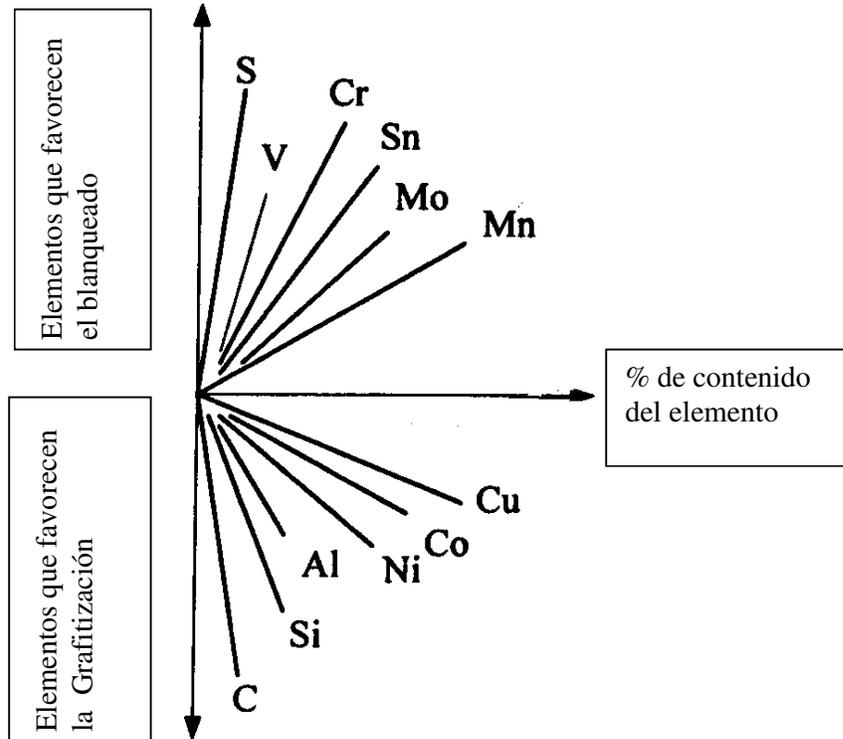


Figura 9. Influencia sobre la tendencia a la grafitización y al blanqueo de algunos elementos aleantes.

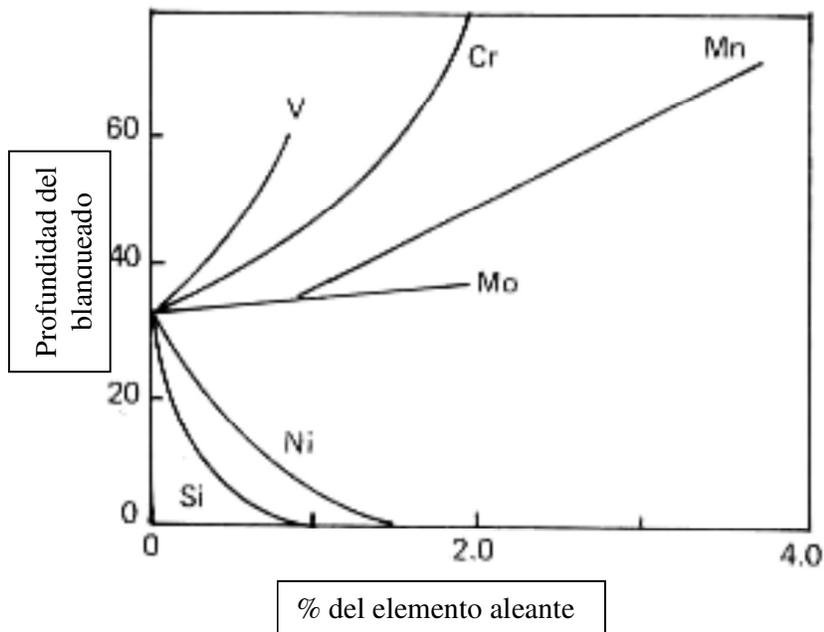


Figura 10. Efecto cuantitativo de algunos elementos aleantes sobre la grafitización y blanqueo, sobre la profundidad de la cuña.

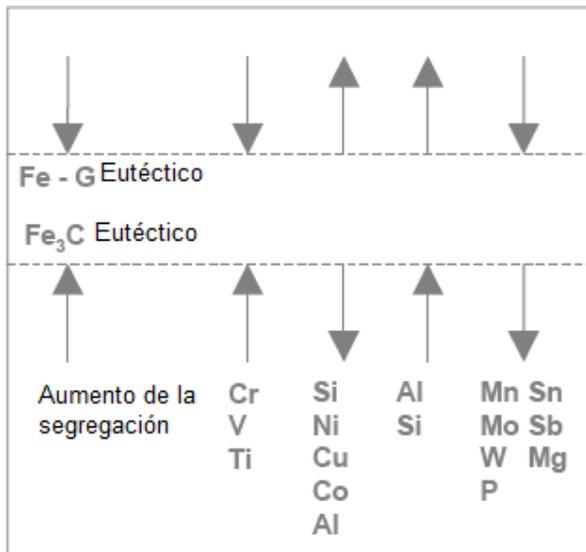


Figura 11. Efecto de algunos elementos aleantes sobre la posición de la temperatura eutéctica para favorecer la solidificación en el diagrama estable y metaestable.

2.6 Teoría de la formación del grafito nodular

Las principales teorías que explican la formación de nódulos de grafito durante la solidificación son complejas y controvertidas, las más usuales son:

- Teoría del crecimiento a partir de un núcleo de partícula.
- Teoría de la energía superficial.
- Teoría del crecimiento dentro de burbujas de gas.
- Teoría del crecimiento a través de la capa de austenita.
- Teoría del crecimiento en estado sólido.

Solo se describirán dos teorías

2.6.1 Teoría de la energía superficial. ⁽²³⁾

Esta teoría se basa en la observación de que la energía superficial entre el grafito y el líquido es más alta en hierro nodular que el hierro gris. Se ha

encontrado una energía superficial de 800-1100 dinas/ cm para el grafito laminar y de 1400 dinas/cm para el grafito esferoidal.

Esta teoría sugiere que la alta energía superficial puede curvar el crecimiento del cristal con el fin de reducir la relación energía/volumen, resultando en grafito esferoidal más que laminar.

En presencia de ciertos activadores de la superficie (tenso activos) el grafito tiende a crecer más rápidamente en la dirección perpendicular al plano basal y esta dirección de crecimiento se obtiene al eliminar oxígeno y azufre. En la figura 12 se muestra el comportamiento del % magnesio residual contra % de grafito.

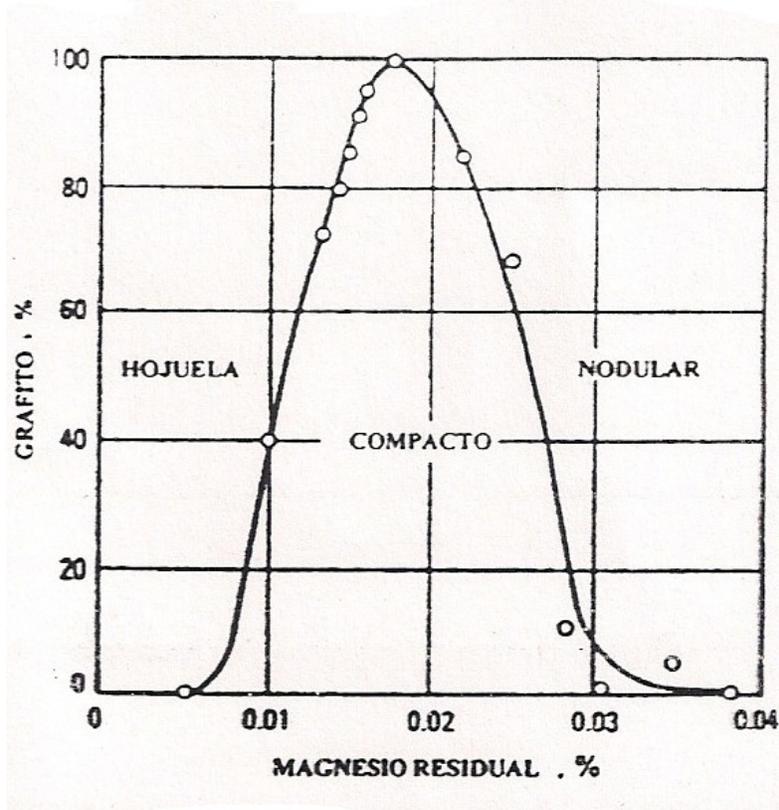


Figura 12. Contenido de magnesio residual sobre % de grafito.

2.6.2 Teoría del crecimiento a través de la capa de austenita. ^(24, 25)

Considerando que el hierro nodular solidifica según el diagrama estable al precipitar los cristales de austenita primaria ésta se satura de grafito ya que están a una temperatura muy elevada. Al irse enfriando el metal y al continuar la línea de transformación estable se obtiene carbono en su variedad alotrópica conocida como grafito.

El mecanismo de solidificación del hierro nodular es más complicado y las dendritas de austenita juegan un papel importante en la solidificación eutéctica. La austenita eutéctica es dendrítica y el grafito esferoidal nuclea independientemente en el líquido. La convección determina la colisión del grafito esferoidal con las dendritas de austenita. La encapsulación del grafito por la austenita puede ocurrir antes o después del contacto entre el grafito y la austenita.

El crecimiento posterior del grafito ocurre por la difusión del carbono a través de la capa de austenita.

La cantidad de nódulos formados está en función de la cantidad de cristales de austenita primaria saturada. Una vez precipitado el grafito el crecimiento del nódulo se controla por difusión. Por último, el crecimiento del grafito en el interior del hierro sólido requerirá una energía considerable para deformar plásticamente a la austenita el crecimiento del carbono grafito dentro del hierro sólido es limitado, esto se muestra en la figura 14.

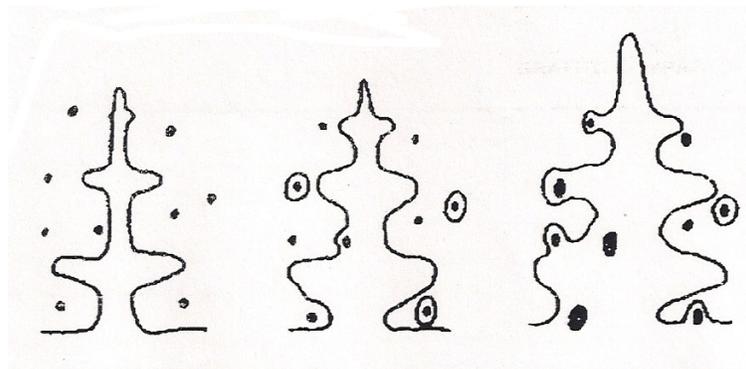


Figura 14. Crecimiento del grafito en el seno del líquido y dentro de la austenita.

La formación de una capa de austenita alrededor del grafito nodular tiene un efecto sobre el deterioro de la forma de grafito. Cuando la austenita nuclea y

crece alrededor del grafito, esta sufre rupturas y se vuelve a fundir formándose pequeños canales de líquido por donde los átomos de carbono pueden difundir en una dirección dando como resultado un deterioro en la forma del grafito. Esto muestra que en un rápido envolvimiento en la capa de austenita produce formas nodulares perfectas, en cambio cuando la austenita envuelve lentamente al carbono o no lo envuelve se tiene formas de grafito deteriorado.

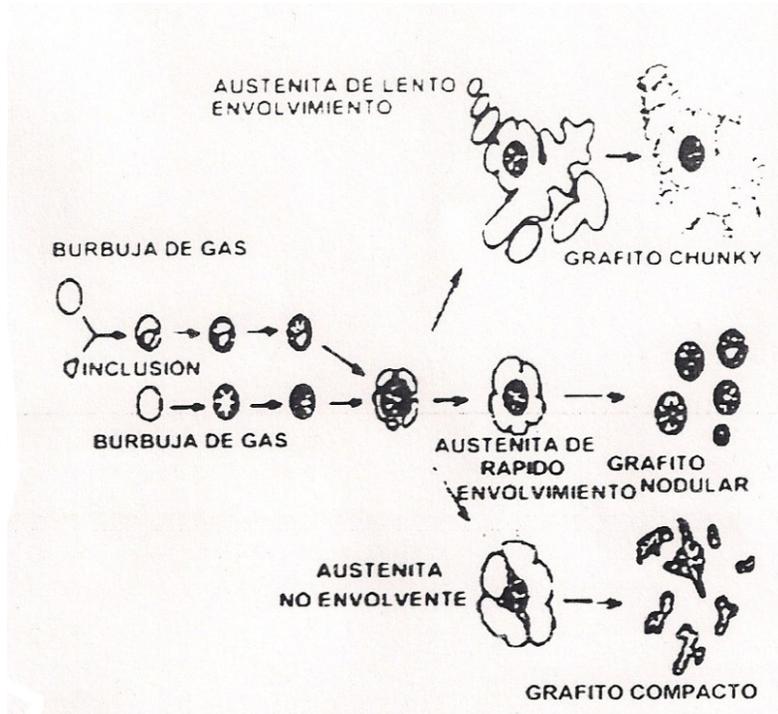


Figura 15. Efecto que provoca la envoltura de la austenita sobre la forma final del grafito

La razón de porque la capa de austenita envuelve rápida o lentamente al grafito, depende de la velocidad de enfriamiento de la fundición.

Un rápido enfriamiento acelera la nucleación y crecimiento de austenita y esta provoca una rápida envoltura alrededor del carbono nucleado.

Un enfriamiento lento dificulta la nucleación y crecimiento de la austenita y al mismo tiempo promueve la segregación de elementos de bajo punto de fusión en los canales de austenita líquida resultado en la formación de formas de grafito deteriorados.

2.7 Velocidad de Enfriamiento

Cuando la velocidad de enfriamiento es tan elevada que conduce a grandes subenfriamientos cinéticos hasta temperaturas menores a la del eutéctico metaestable, T_{EM} , en vez de solidificar el eutéctico con grafito se producirá un eutéctico con carburos, es decir solidificará ledeburita.

Una vez que el líquido se ha subenfriado cinéticamente hasta una temperatura menor a la del eutéctico metaestable la cinética de la reacción eutéctica permite un breve periodo de tiempo la formación de carburos eutécticos.

En consecuencia, el calor latente de solidificación que ha evolucionado produce un aumento en la temperatura del líquido remanente lo que dificulta mantener las condiciones para suprimir la reacción eutéctica con grafito.

De este modo se producen microestructuras completamente blancas donde el subenfriamiento cinético ha sido muy severo; rodeado de aéreas moteadas con microestructuras mixta donde el subenfriamiento ha sido menos severo, y un área completamente blanqueada debido a que el subenfriamiento no se extendió por debajo de la temperatura del eutéctico metaestable.

Los carburos formados por enfriamiento rápido (CHILL) se producen durante las primeras etapas de la solidificación, cuando ocurren en condiciones de metaestabilidad. Los hierros más susceptibles de producir carburos por enfriamiento rápido son los hierros que tienen bajo carbón equivalente, o son las que presenta valores bajos de índice de saturación de carbono y aquellas en que las condiciones de nucleación no sean las adecuadas.

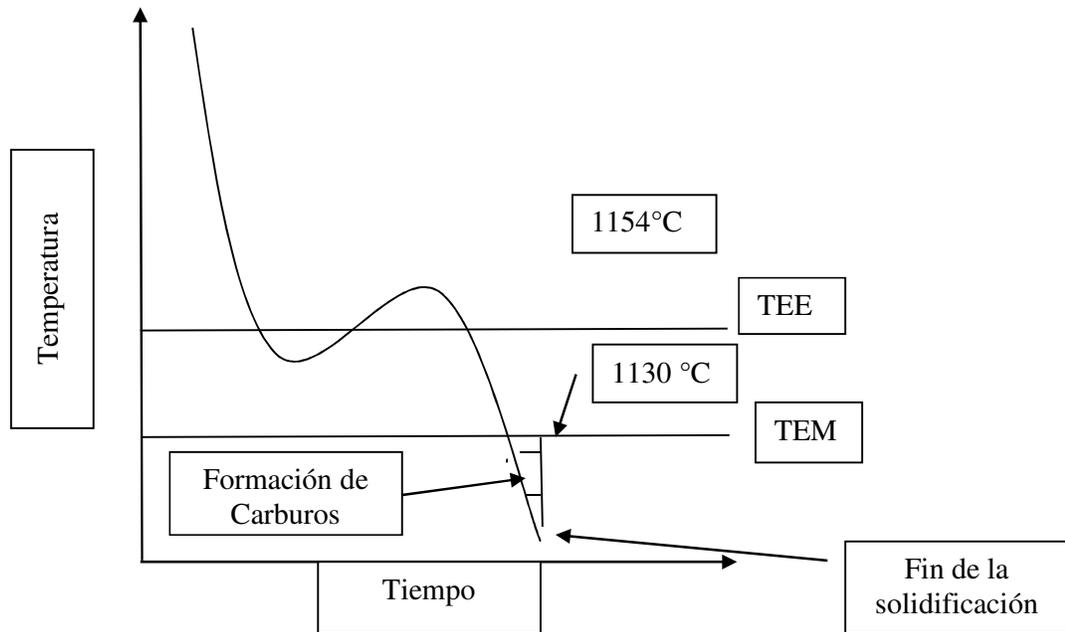


Figura 16. Condiciones de enfriamiento bajo las que favorece la formación la presencia carburos (referencia. Tesis Claudia Flores Vargas 2007).

Nota: TEE = Temperatura eutética estable

TEM = Temperatura eutética metaestable

CAPITULO III

3. Desarrollo experimental

Para la fabricación de las piezas de hierro nodular con fracciones controladas de carburos, se definieron tres condiciones a controlar:

- a.- Composición Química (balance del carbono y silicio).
 - b.- Velocidad de enfriamiento.
 - c.- Adición de elementos aleantes formadores de carburos
- a.- Composición Química.

Esta condición se mantuvo constante, de tal manera que el carbón y el silicio fuera lo más cercano a la composición eutéctica, C.E.=4.3%.

- b.- Velocidad de enfriamiento.

Se utilizaron tres diferentes medios de enfriamiento:

- 1.-molde de arena en verde.
- 2.-Carcasa de hierro colado.
- 3.-Carcasa de aluminio.

Dentro de los tres medios de enfriamiento tienen un corazón de arena obtenido por el proceso de silicato-CO₂.

- c.- Adición de elementos aleantes formadores de carburos

Se controlaron los niveles de adición de Mn, Cr y Mo, considerados de acuerdo a la bibliografía como formadores de carburos.

En este caso el manganeso se mantuvo en el nivel más alto y constante de 0.75-0.8%, mientras que el molibdeno (0 y 0.5 %) y cromo se variaron (0 y 0.8 %).

3.1 Modelo y Molde.

Para la fabricación del hierro nodular con fracciones controladas de carburos, se considero una pieza que tuviera un modulo de solidificación grande, con el propósito de tener zonas de enfriamiento lento, en las cuales es más difícil la formación de carburos. El cálculo de modulo de solidificación se baso en una esfera de 7.6 cm (3 plg.) de diámetro, para determinar las dimensiones del modelo en forma de placa, que se utilizo en el experimento. Considerando la expresión básica para el cálculo del modulo de solidificación:

$$M = \frac{Volumen}{Area}$$

Modulo de la esfera:

$$M = \frac{231.667cm^3}{182.415cm^2} = 1.27cm$$

Para la placa:

Longitud = 27.5cm

Altura = 14cm

Espesor = 3.5cm

Modulo de la placa:

$$M = \frac{1347.5cm^3}{1060.5cm^2} = 1.2706cm$$

En las figuras 17, 18 y 19 se muestran las dimensiones del modelo, molde de silicato CO₂ y carcasa.

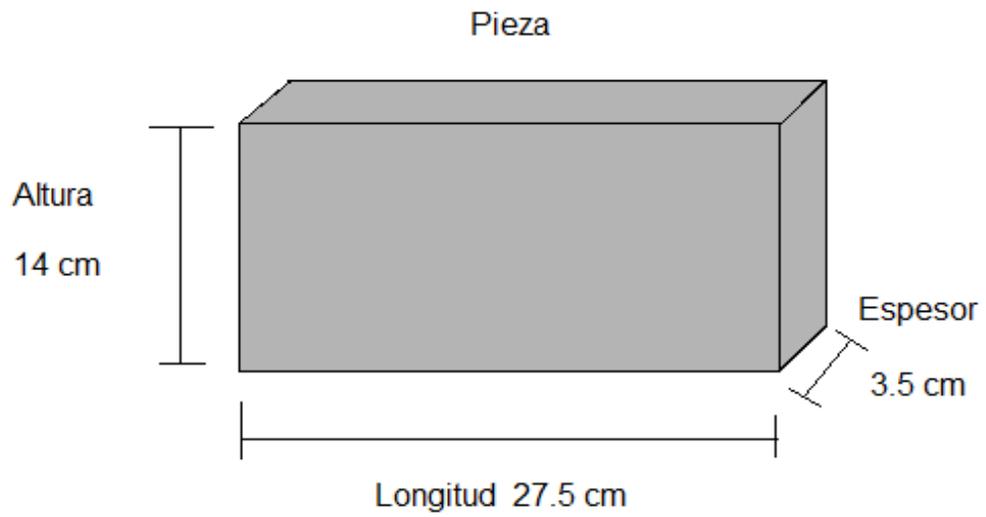


Figura 17. Dimensiones de la pieza.

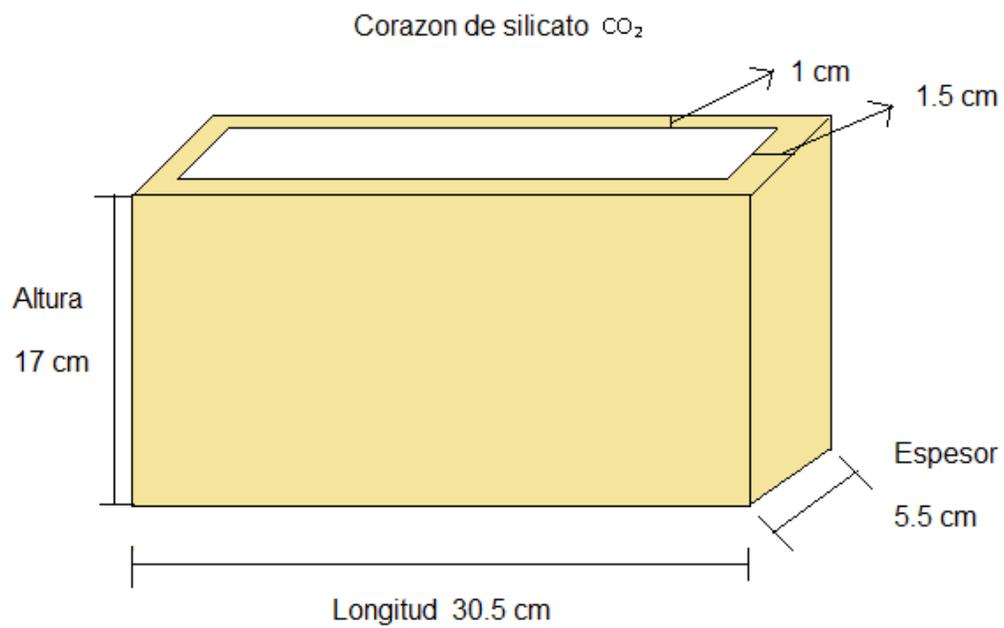


Figura 18. Dimensiones del molde de silicato CO_2 .

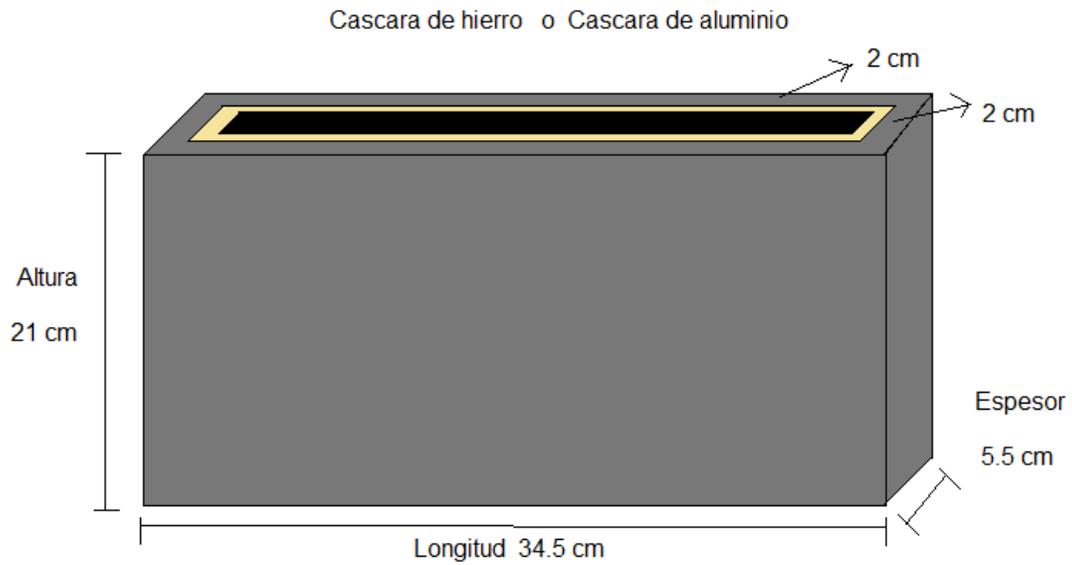


Figura 19. Dimensiones de la Cascara de hierro y de aluminio.

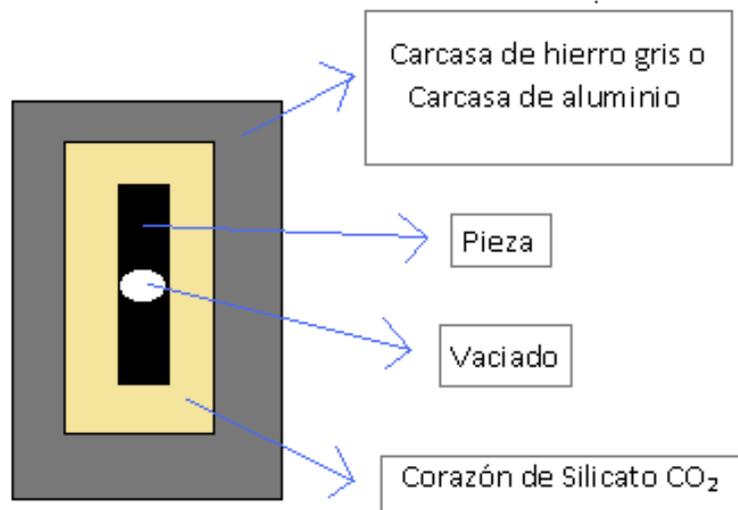


Figura 20. Esquema completo del experimento.

Una vez obtenida las dimensiones de la placa equivalente, se procedió a elaborar las cajas metálicas que se utilizaron como medios de extracción de calor. Para ello se fabricaron dos cajas una con enfriadores aluminio, una con

enfriadores de hierro gris y una con enfriadores de arena en verde, en las cuales se colocaron dentro un molde de silicato CO_2 con el propósito de variar la velocidad de extracción de calor y con esto la velocidad de enfriamiento, esto se aprecia en la Figura 21, 22 y 23.



Figura 21. Molde con caja de aluminio.



Figura 22. Molde con caja de hierro colado.



Figura 23. Molde de arena en verde.

3.2 Técnica de fusión en horno de inducción

Para la obtención de los hierros experimentales se utilizó un horno de inducción eléctrico de alta frecuencia, con una capacidad de 100 Kg y con una potencia de 75 KWH.



Figura 24: Horno de inducción de alta frecuencia.

La técnica de fusión permite fabricar una aleación mediante una metodología en la que se trata de controlar la oxidación de los elementos (perdidas), así como hacer eficientes los tratamientos adicionales como son la inoculación y la nodularización durante el proceso de fabricación, la técnica de fusión aplicada en la etapa experimental se describe a continuación:

- Se introduce al horno de inducción la cantidad de chatarra de hierro según el balance de carga, hasta fundirse.
- Se adiciona la cantidad requerida de recarburante.
- Inmediatamente se adiciona la chatarra de acero para evitar que el recarburante este en contacto con la atmósfera oxidante y tanto el recarburante como el acero se disuelvan, la base de cálculo para fabricar el hierro nodular fue de 60Kg.
- Se retira la escoria formada durante la fusión de las chatarras de hierro, acero y el recarburante.
- Retirada la escoria se realiza la adición de las ferroaleaciones para introducir las cantidades deseadas de aleante, según el balance de carga.
- Una vez adicionadas las ferroaleaciones y después de un tiempo adecuado de disolución, se tomo una muestra preliminar para ser analizada en un espectrómetros de emisión atómica, si la composición se encuentra fuera del rango requerido se ajusta la composición química mediante la adición de ferroaleaciones y se toma nuevamente una muestra para análisis químico hasta tener la composición deseada.
- La temperatura de vaciado del horno de inducción a la olla de tratamiento con noduloy fue de 1480°C.
- El método para obtener el hierro nodular con noduloy fue el del sándwich, explicado previamente en capítulos anteriores.
- Realizado el tratamiento de nodularización con noduloy se retira la escoria para tomar la muestra de composición química final.
- Con un pirómetro de inmersión con bulbo de termopar tipo “S” se mide y registra la temperatura del hierro líquido.
- El metal es vaciado a los moldes a la temperatura establecida en el diseño de experimentos (1350-1400 C).

3.3 Materiales de carga

Su composición química de los materiales de carga utilizados para fabricar los hierros nodulares se representan en las tablas 10 a 16:

Tabla 10: Se presenta la composición química del ferrosilicio (FeSi75).

Elemento	Si	C máx.	S máx.	P máx.	Mg	Al	Fe
% Peso	74 – 79	0.15	0.025	0.035	0.55	1.5	23 – 28

Tabla 11: Se presenta la composición química del ferromolibdeno (FeMo70).

Elemento	Mo	Si	Cu	S	P	Fe
% Peso	71.11	1.24	0.51	0.085	0.027	27.028

Tabla 12. Representa la composición química del ferrocromo (FeCr).

Elemento	% Cr	% C	% Si	% P	% S	% Fe
% Peso	60 - 70	0.03 – 0.5 máx.	2 máx.	0.04 máx.	0.03 máx.	27.9 – 37.9

Tabla 13. Representa la composición química del noduloy (R6).

% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Mg	% Fe
3.583	2.53	0.555	0.00218	0.014	0.0285	92.9

Tabla 14. La chatarra de acero troquel tiene la siguiente composición química;

% C	% Si	% Mn	% Cr	% Mo	% Fe
0.0680	0.0165	0.1921	0.0166	0.0390	99.5

Tabla 15: La chatarra de acero estructural tiene la siguiente composición química:

% C	% Si	% Mn	%Cr	% Mo	% Fe
-----	------	------	-----	------	------

0.1368	0.2413	0.907	0.0160	0.0309	98.6
--------	--------	-------	--------	--------	------

Tabla 16: La chatarra de hierro gris tiene la siguiente composición.

% C	% Si	% Mn	% S	% Mg	% P
3.583	2.53	0.555	0.014	0.0285	0.00218

Las composiciones químicas de las chatarras se obtuvieron a través de un análisis químico hecho en un espectrómetro de emisión atómica de la marca Spectro Analytical Instruments y modelo Spectrolab (EEA).



Figura25: Espectrómetro de emisión atómica (EEA).

Coladas realizadas

Se realizaron las siguientes coladas experimentales

Primera colada: se realizo sin elementos aleantes solo manteniendo el % de Mn en el nivel más alto de 0.8 %, y relacionarlo con las condiciones de velocidad de enfriamiento impuestas por los moldes descritos anteriormente.

Segunda colada: se realizo manteniendo el 0.8 %Mn y adicionando 0.5 %Mo.

Tercera colada: se realizo manteniendo a 0.8 %Mn, 0.5 %Mo y adicionando además 0.8 %Cr. En la tabla 17, se presenta el cuadro experimental con la nomenclatura de identificación de cada pieza.

Tabla 17. Cuadro de diseño experimental.

Composición Química	Medio de enfriamiento Molde Arena	Medio de enfriamiento Molde Hierro Colado	Medio de enfriamiento Molde Aluminio
Sin aleantes con 0.8%Mn	MA	MHC	MAI
Con 0.8%Mn y 0.5%Mo	MA–Mo	MHC–Mo	MAI–Mo
Con 0.8%Mn, 0.5%Mo y 0.8%Cr	MA–MoCr	MHC–MoCr	MAI–MoCr

MA = Enfriado en Molde de Arena.

MHC = Enfriado en Molde en Hierro Colado.

MAI = Enfriado en Molde en Aluminio.

Mediante el diseño experimental se evaluó la interacción entre el efecto de la velocidad de enfriamiento y los aleantes estabilizadores de carburos (Mo y Cr), manteniendo constante el nivel de Mn.

El contenido de los elementos aleantes Mo y Cr fueron considerados en base a la bibliografía considerando el poder de estabilización de carburos de estos elementos.

3.4 Evaluación Microestructural

Una vez obtenida las piezas se realizaron los siguientes cortes:

Primero se retiro el alimentador, después se le realizo un corte transversal y posteriormente a la pieza obtenida del corte transversal se cortó en tres tamaños iguales, todos los cortes se realizaron con un esmeril con disco de corte de diamante, de acuerdo a la figura 28.

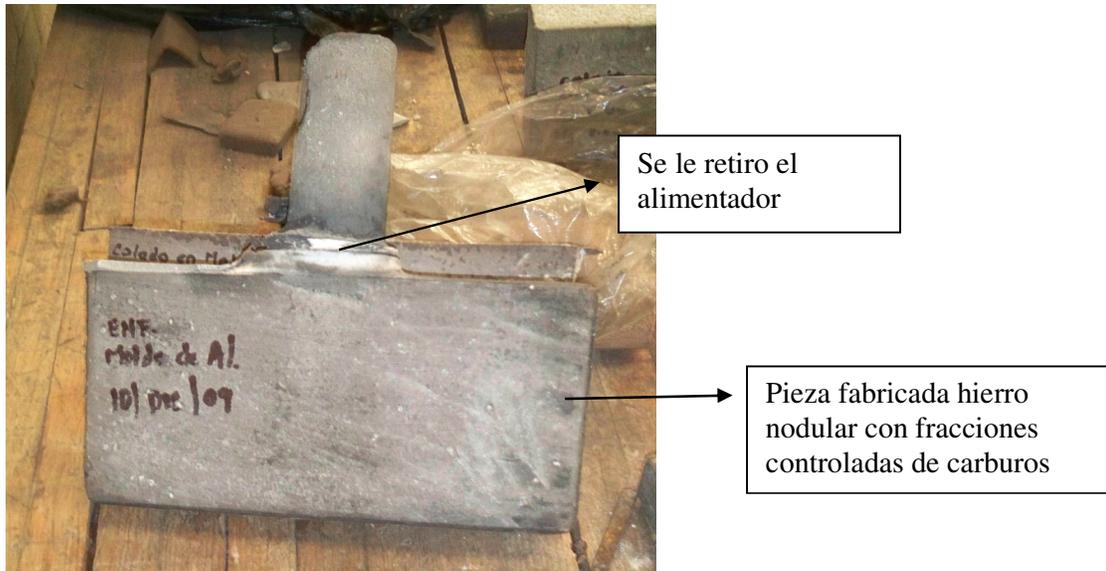


Figura 26. Pieza obtenida de la colada.



Figura 27. Muestra el corte realizado

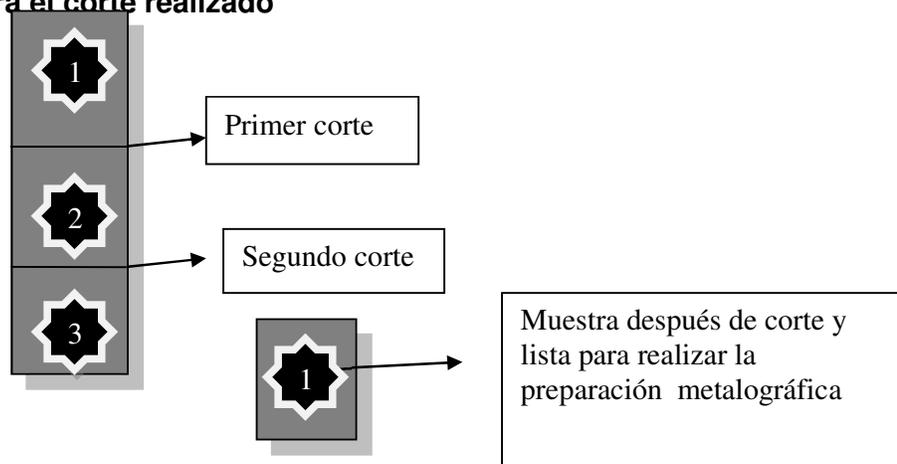


Figura 28. Seccionamiento de las piezas coladas

Preparación Metalográfica

Se realizaron los pasos siguientes

Primer paso. Se lija pieza empezando con lija No 240, la segunda que se ocupa es una lija No 320, la tercera que se ocupa es una lija No 400 y por último se ocupa una lija No 600.

Segundo paso. Se pule la pieza en un paño grueso para quitar los rayones que quedaron de la lija No 600.

Tercer paso. Se pule la pieza en un paño fino para quitar los rayones que quedaron del paño grueso, la pieza debe quedar pulida a espejo.

Después de obtener la muestra pulida a espejo se realiza el ataque en dos pasos:

1.- Un ataque ligero con una solución de Nital 2, para poder observar la matriz de la pieza.

2.- Un ataque severo con persulfato de amonio, se utiliza para obscurecer la matriz y dejar visibles los carburos que hay en la pieza, sin embargo con esta solución se requería de un tiempo de exposición largo, mayores a 10 minutos y el contraste entre la matriz y los carburos no era adecuado, y además la pieza tenía que ser calentada a una temperatura de 60°C. Como opción de ataque se aplicó una solución de: 10mL HNO₃, 4mL HF y 87mL de agua destilada, la cual requería un tiempo de exposición de 1 a 2 minutos, aplicada a temperatura ambiente y con un buen contraste entre la matriz y los carburos.

Todo el procedimiento anterior se realizó para las tres coladas, a partir de cada colada se obtuvieron 3 piezas con diferente tipo de molde, como fue indicado, por lo que se obtuvieron 27 muestra para análisis y cuantificación metalográfica.

CAPITULO IV
RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Primera colada

Las piezas obtenidas de hierro nodular, para la primera colada en la que se mantuvo el carbono y silicio constante, de tal manera que el carbón equivalente fue de 4.35. Para la primera colada en la que no se agregaron elementos aleantes, los resultados de la evaluación metalográfica para cada tipo de molde, se presentan las tablas. 16, 16.1 y 16.2, las microestructuras correspondientes se muestran en las figuras 25, 25.1 y 25.2.

Tabla 16. Resultados obtenidos para el enfriamiento en el molde con caja de aluminio.

Sección de la pieza	% Nodularización	Tamaño de los nódulos	Densidad de nódulos	% Carburos comparados con patrones AFS	% Carburos Determinados
Parte superior de la pieza	80	5 y 6	100	0	0
Parte intermedia de la pieza	90	6 y 7	120	0	0
Parte inferior de la pieza	90	6 y 7	120	0	0
Promedio	86.6	-	113.3	0	0

Tabla 16.1. Resultados obtenidos para el enfriamiento en el molde con caja de hierro colado.

Sección de la pieza	% Nodularización	Tamaño de los nódulos	Densidad de nódulos	% Carburos comparados con patrones AFS	% Carburos Determinados
Parte superior de la pieza	100	6	120	0	0
Parte intermedia de la pieza	100	6 y 7	150	0	0
Parte inferior de la pieza	100	6 y 7	150	0	0

Tabla 16.2. Resultados obtenidos para el enfriamiento en molde de arena en verde.

Sección de la pieza	% Nodularización	Tamaño de los nódulos	Densidad de nódulos	% Carburos comparados con patrones AFS	% Carburos determinados
Parte superior de la pieza	80	5 y 6	100	0	0
Parte intermedia de la pieza	80	5 y 6	100	0	0
Parte inferior de la pieza	90	6 y 7	120	0	0

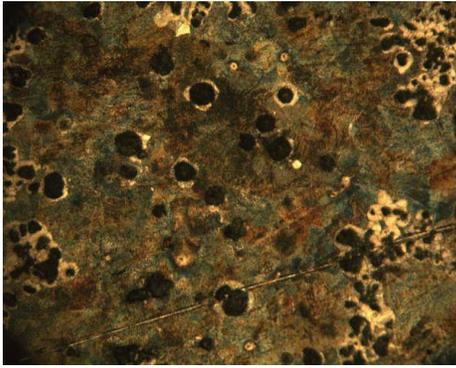


Figura 25. Imagen tomada de la pieza solidificada en la carcasa de aluminio a 100x, parte intermedia de la pieza. Se observa que se obtuvo un hierro nodular, sin la presencia de carburos en la pieza.

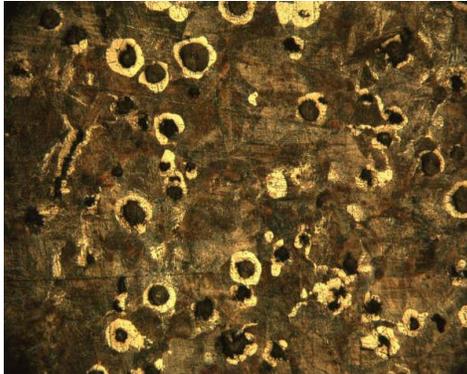


Figura 25.1. Imagen tomada de la pieza solidificada en la carcasa de hierro a 100x, parte intermedia de la pieza. Se observa que se obtuvo un hierro nodular sin carburos.

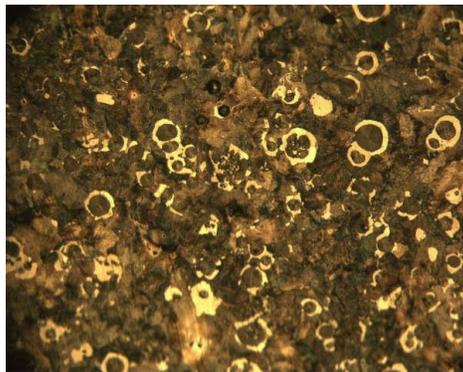


Figura 25.2. Imagen tomada de la pieza solidificada en el molde de arena en verde a 100x, parte intermedia de la pieza. Se obtuvo un hierro nodular sin carburos.

De las tablas 16, 16.1 y 16.2 para cada condición de enfriamiento se observa que la microestructura en las tres diferentes zonas de la pieza es homogénea (% de nodularización, densidad de nódulos, tamaño de nódulos), sin embargo para la primera colada no se formaron carburos esto debido a que durante la solidificación la velocidad de enfriamiento no atravesó la temperatura eutéctica metaestable, la cual promueve la formación de carburos.

4.2 Segunda colada

Para la segunda colada se obtuvo un carbón equivalente de 4.44, a la cual se le agregaron elementos aleantes debido a que en la primera fusión no se obtuvieron carburos, se le agrego 0.49%Mo para favorecer la formación de carburos en la pieza y se obtuvieron los siguientes resultados que se muestran en las siguientes tablas. 17, 17.1 y 17.2, las microestructuras correspondientes se muestran en las siguientes figuras 26, 26.1 y 26.2.

Tabla 17. Resultados obtenidos para el enfriamiento en el molde con caja de aluminio.

Sección de la pieza	% Nodularización	Tamaño de los nódulos	Densidad de nódulos (Nódulos/mm ²)	% Carburos comparados con patrones AFS	% Carburos determinados
Parte superior de la pieza	100	6 y 7	120	10-15	11.182
Parte intermedia de la pieza	100	6 y 7	100	10 - 15	13.710
Parte inferior de la pieza	90	5 y 6	95	10 -15	11.777

Tabla 17.1. Resultados obtenidos para el enfriamiento en molde con caja de hierro colado.

Sección de la pieza	% Nodularización	Tamaño de los nódulos	Densidad de nódulos	% Carburos comparados con patrones AFS	% Carburos determinados
Parte superior de la pieza	90	5 y 6	100	10 – 15	11.476
Parte intermedia de la pieza	100	6	120	10 - 15	12.569
Parte inferior de la pieza	100	6	100	10 - 15	12.843

Tabla 17.2. Resultados obtenidos para el enfriamiento en molde de arena en verde.

Sección de la pieza	% Nodularización	Tamaño de los nódulos	Densidad de nódulos	% Carburos comparados con patrones AFS	% Carburos determinados
Parte superior de la pieza	100	6 y 7	120	10 – 15	10.566
Parte intermedia de la pieza	100	6 y 7	100	10 – 15	11.931
Parte inferior de la pieza	90	6	100	10 - 15	11.458

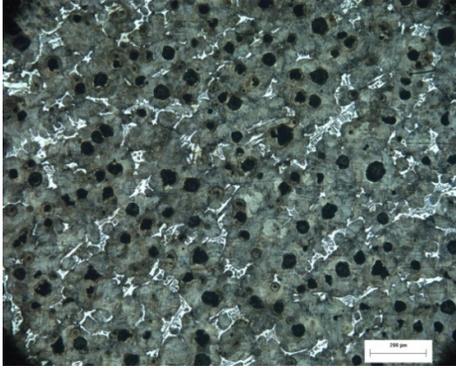


Figura 26. Imagen tomada de la pieza solidificada en la carcasa de aluminio a 100x, parte intermedia de la pieza. Se puede observar que se obtuvo un hierro nodular con 15% de carburos.

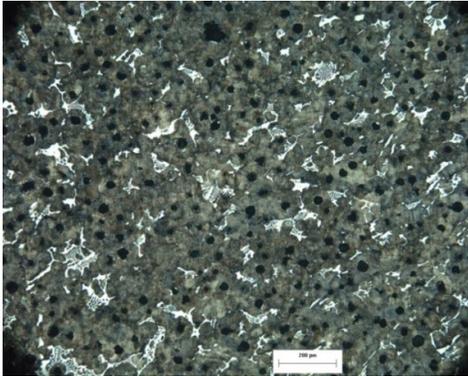


Figura 26.1. Imagen tomada de la pieza solidificada en la carcasa de hierro a 100x, parte intermedia de la pieza. Se puede observar que se obtuvo un hierro nodular con 15% de carburos.

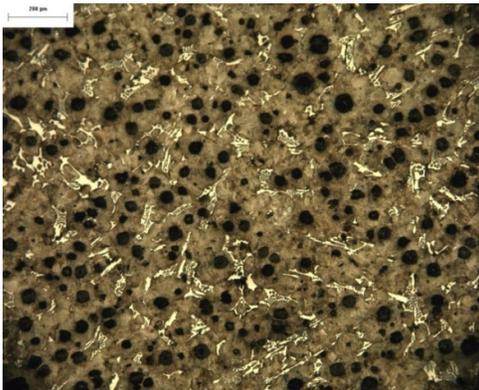


Figura 26.2. Imagen tomada de la pieza solidificada en el molde de arena en verde a 100x, parte intermedia de la pieza. Se puede observar que se obtuvo un hierro nodular con 15% de carburos.

La escala que se maneja en las tres figuras es de 200μm.

De las tablas 17, 17.1 y 17.2 para cada condición de enfriamiento se observa que la microestructura en las tres diferentes zonas de la pieza es homogénea (% de nodularización, densidad de nódulos, tamaño de nódulos y % de carburos formados), sin embargo para la segunda colada, se obtuvo entre 11 a 13 % de carburos formados, solo agregando 0.48% de Mo.

4.3 Tercera colada

Para la tercer colada se obtuvo un carbón equivalente de 4.32, a la cual se le agrego mayor cantidad de elementos aleantes debido a que en la segunda fusión se obtuvieron carburos entre 18-25%, se le agrego 0.72% de Cr y 0.49%Mo para aumentar la formación de carburos en la pieza y se obtuvieron los siguientes resultados los cuales se muestran en las siguientes tablas. 18, 18.1 y 18.2, las microestructuras correspondientes se muestran en las siguientes figuras 27, 27.1 y 27.2.

Tabla 18. Resultados obtenidos para el enfriamiento en el molde con caja de aluminio.

Sección de la pieza	% Nodularización	Tamaño de los nódulos	Densidad de nódulos	% Carburos comparados con patrones AFS	% Carburos analizados
Parte superior de la pieza	95	6	80	>40	48.974
Parte intermedia de la pieza	90	6	80	>40	49.097
Parte inferior de la pieza	90	6	80	>40	49.909

Tabla 18.1. Resultados obtenidos para el enfriamiento en molde con caja de hierro colado.

Sección de	%	Tamaño de	Densidad de	% Carburos comparados	% Carburos

la pieza	Nodularización	los nódulos	nódulos	con patrones AFS	determinados
Parte superior de la pieza	90	6	90	>40	50.875
Parte intermedia de la pieza	90	6	90	>40	51.754
Parte inferior de la pieza	90	6	85	>40	51.965

Tabla 18.2. Resultados obtenidos para el enfriamiento en molde de arena en verde.

Sección de la pieza	% Nodularización	Tamaño de los nódulos	Densidad de nódulos	% Carburos comparados con patrones AFS	% Carburos determinados
Parte superior de la pieza	90	6 y 7	90	>40	48.632
Parte intermedia de la pieza	90	6	100	>40	47.498
Parte inferior de la pieza	80	6	100	>40	48.176

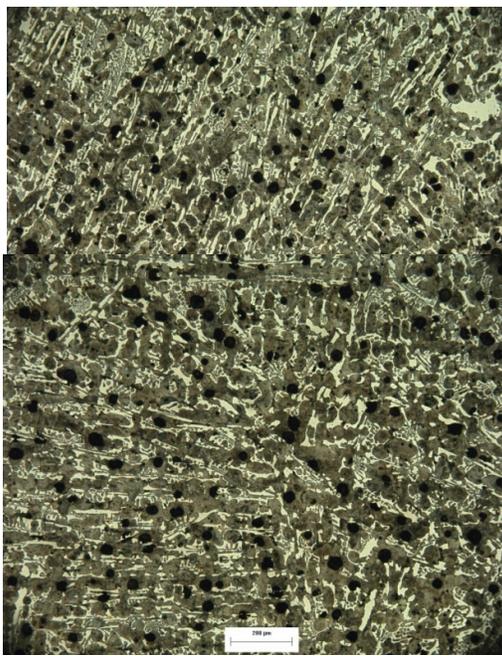


Figura 27. Imagen tomada de la pieza solidificada en la carcasa de aluminio a 100x, parte media de la pieza. Se observa que se obtuvo un hierro nodular con >40% de carburos.

Figura 27.1. Imagen tomada de la pieza solidificada en la carcasa de hierro a 100x, parte media de la pieza. Se observar que se obtuvo un hierro nodular con >40% de carburos

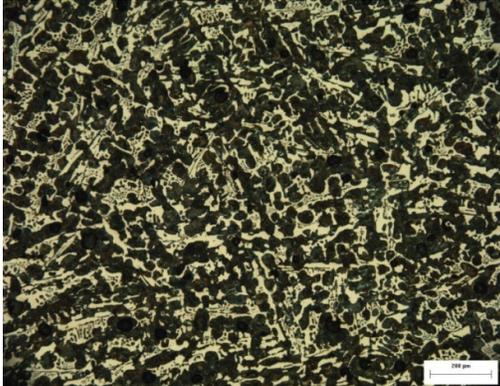


Figura 27.2. Imagen tomada de la pieza solidificada en el molde de arena en verde a 100x, parte media de la pieza. Se observa que se obtuvo un hierro nodular con > 40% de carburos

La escala que se maneja en las tres figuras es de 200µm.

De las tablas 18, 18.1 y 18.2 para cada condición de enfriamiento se observa que la microestructura en las tres diferentes zonas de la pieza es homogénea (% de nodularización, densidad de nódulos, tamaño de nódulos y % de carburos formados), sin embargo para la tercera colada, se mantuvo 0.47%Mo y se agregó 0.8% Cr para incrementar la formación de carburos hasta llegar a un porcentaje de entre 48 a 52% de carburos.

4.4 Observaciones y análisis de resultados

Con los resultados obtenidos se analizan las dos variables de control, velocidad de enfriamiento y adición de elementos aleantes. Recordar que la composición química (carbono equivalente) no se modificó ya que se quería un hierro nodular de composición cercana a la eutéctica.

Cuando la velocidad de enfriamiento es elevada, lo cual provoca grandes subenfriamientos cinéticos hasta temperaturas menores al eutéctico metaestable se producirá un eutéctico con carburos.

Velocidad de enfriamiento: en base a los resultados obtenidos se observa que esta variable no influye en el porcentaje de carburo, ya que no hay un cambio

significativo, la diferencia entre las microestructuras es del orden de 3% de carburos entre los tres medios de enfriamiento, observar la tabla 19.

Tabla 19. Porcentaje de carburos obtenidos para las tres composiciones químicas en los diferentes medios de enfriamiento.

Medio de enfriamiento	% Carburos primera colada	% Carburos segunda colada	% Carburos tercera colada
Enfriador en molde de arena en verde	0	11.318	48.632
Carcasa de aluminio	0	12.223	49.326
Carcasa de hierro colado	0	12.296	51.531

Con la velocidad de enfriamiento se esperaba obtener una mayor diferencia entre la cantidad de carburos en la pieza experimentales, sin embargo no se obtuvieron estos resultados, esto pudo ser provocado debido a que los medios de enfriamiento no tenían las dimensiones suficientemente grandes para alterar la velocidad de enfriamiento, y ocurrió una saturación térmica de los moldes.

Se observó que la diferencia de % de carburos obtenidos en los tres diferentes medios de enfriamiento es de 3% máximo, lo que indica que la velocidad de enfriamiento no fue una variable que afectara las condiciones de blanqueo del hierro nodular. Notar que en la segunda colada la variación en la fracción de carburos en el molde con caja de hierro y el molde con caja de aluminio la variación es insignificante. Comparándolos con el molde de arena la variación solo es del 1 %.

Los elementos aleantes desplaza la temperatura eutéctica metaestable provocando que la diferencia de de temperatura estable y metaestable sea poca, lo cual genera la precipitación de carburos en la pieza.

Los elementos aleantes (Mo y Cr), son la variable que controlan fuertemente la formación de carburos, esto se puede constatar en los resultados obtenidos, ya que en la primera colada donde no se agregaron elementos aleantes no hay presencia de carburos, para la segunda colada a la que se agregó 0.49 %Mo, se obtuvo entre 10-15% de carburos y para la tercera colada a la que se adiciono 0.47 % Mo y 0.8 % Cr, el % de carburos se incremento hasta 45-52 %.

El azufre y el vanadio son los mejores elementos para la formación de carburos sin embargo en azufre no debe de exceder del 0.02% debido a que provocaría un gasto excesivo de magnesio debido a que formaría un sulfuro de magnesio el cual es antigrafitizante, el vanadio incrementaría el costo del hierro nodular base.

Primero se utilizo Molibdeno a 0.49% y se obtuvo entre 10 y 15% de carburos, este % de carburos en general es bajo para fabricar hierros CADI de acuerdo con estudios sobre el tema (REFERENCIA John R. Keough, PE y Kathy L. Hayrynen, PhD "Carbide Austempered hierro dúctil (CADI) "2000.), ya que este % no afecta significativamente el incremento en resistencia al desgaste y abrasión.

Para incrementar hasta valores mayores al 45% de carburos, niveles de adición de 0.8% resulta altamente eficiente y probablemente con carburos más estables que los obtenidos solo con molibdeno.

Los hierros nodulares de colada con más del 45 % de carburos formados durante la solidificación y estabilizados con altos contenidos de cromo, probablemente se desempeñen mejor como materia prima para asegurar la formación de hierros CADI después del tratamiento isotérmico, sin afectar sensiblemente la disolución de carburos especialmente en la etapa de austenización.

Las mejores condiciones de fabricación necesarias para hierro nodular con fracción controlada de carburos, que tenga un modulo de solidificación de 1.27cm implica controlar la composición química siguiente:

Tabla 20. Composición química obtenida.

% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Mo	% Cu	% Mg
3.609	1.909	0.776	0.0166	0.0165	0.8	0.4778	0.3857	0.0365

En el anexo 3 se muestra el análisis químico completo de la tercera colada.

Principalmente se debe controlar el Cr y Mo ya que son los elementos aleantes que promueven la formación de carburos, también requiere que el corazón de silicato CO_2 sea recubierto con la carcasa de hierro colado, para la cual se obtuvo hasta un 52% de carburos homogéneos en la pieza.

Conclusiones y Sugerencias

Conclusiones

Los resultados de este trabajo arrojan las siguientes conclusiones:

- 1) La variable más importante y por lo tanto se puede considerar como variable de control es la cantidad de elementos aleantes en presencia.
- 2) Las condiciones de enfriamiento experimentales no favorecen significativamente el blanqueo de las piezas.
- 3) El molibdeno promovió la formación entre 10 y 15 % de carburos.
- 4) De la combinación de 0.8 % Cr y 0.48 % Mo se obtuvo hasta un 52% de carburos en la pieza.
- 5) Las mejores condiciones para este trabajo son: contenidos de 0.8% de Cr, 0.48% Mo, con carbono equivalente de 4.3 y cubrir el molde de silicato CO_2 con la carcasa de hierro colado, con lo cual se obtuvo 52% de carburos.

Sugerencia

- 1) El material obtenido servirá como base para experimentar el efecto de los tratamientos isotérmicos de austemperizado para fabricar hierros CADI.

ANEXO 1

Balance de carga para primera Fusión

Hierro Nodular Clase 120-90-02 Matriz 100% Perlita

28 Kg olla

Composición química del Noduloy

Fe= 48.9%

Si = 44.87%

Mg = 6.34%

Composición requerida de Magnesio Mg=0.05%

$$\frac{28Kg * \left(\frac{0.05}{100}\right)}{\left(\frac{45}{100}\right)} = 0.03111Kg = 31.111g Mg$$

Regla de 3

100g Aleación ----- 6.34g Mg

X ----- 31.111g Mg

$$31.111g Mg * \left(\frac{100g aleación}{6.34g Mg}\right) = 490.712g de aleación (noduloy)$$

Balance para el Silicio (lo que aporta noduloy)

$$\frac{490.712g de aleación * \left(\frac{44.87}{100}\right)}{\frac{98}{100}} = 224.67g Si = 0.22467Kg Si$$

$$0.22467Kg Si * \left(\frac{100}{28}\right) = 0.802413 \% Si aporta el noduloy$$

Elemento crítico el Si; Composición química requerida del Si = 2.3% de Si

$$\%Si = 2.3\% - 0.802413\%(Noduloy) = 1.49759\% Si \text{ (requerido)}$$

Composición obtenida de un balance previo.

15 Kg de Chatarra de hierro

9 Kg Chatarra estructural

4 Kg Troquel

Balance para Chatarra de hierro

$$\%C \frac{15 \text{ Kg} \left(\frac{3.583}{100} \right)}{\left(\frac{96}{100} \right)} = 0.559843 \text{Kg } C$$

$$\%Si \frac{15 \text{ Kg} \left(\frac{2.53}{100} \right)}{\left(\frac{98}{100} \right)} = 0.3872448 \text{Kg } Si$$

$$\%Mn \frac{15 \text{ Kg} \left(\frac{0.555}{100} \right)}{\left(\frac{99}{100} \right)} = 0.0840909 \text{Kg } Mn$$

$$\%S \frac{15 \text{ Kg} \left(\frac{0.014}{100} \right)}{\left(\frac{100}{100} \right)} = 0.0021 \text{Kg } S$$

$$\%Mg \frac{15 \text{ Kg} \left(\frac{0.0285}{100} \right)}{\left(\frac{100}{100} \right)} = 0.004275 \text{Kg } Mg$$

$$\%P \frac{15 \text{ Kg} \left(\frac{0.00218}{100} \right)}{\left(\frac{100}{100} \right)} = 0.000327 \text{Kg } P$$

Balance Para chatarra estructural:

$$\%C \frac{9 \text{ Kg} \left(\frac{0.1368}{100} \right)}{\left(\frac{96}{100} \right)} = 0.012825 \text{Kg } C$$

$$\%Si \frac{9 \text{ Kg} \left(\frac{0.2413}{100} \right)}{\left(\frac{98}{100} \right)} = 0.02216 \text{Kg Si}$$

$$\%Mn \frac{9 \text{ Kg} \left(\frac{0.907}{100} \right)}{\left(\frac{99}{100} \right)} = 0.082455 \text{Kg Mn}$$

$$\%S \frac{9 \text{ Kg} \left(\frac{0.0037}{100} \right)}{\left(\frac{100}{100} \right)} = 0.000333 \text{Kg S}$$

$$\%Cr \frac{9 \text{ Kg} \left(\frac{0.016}{100} \right)}{\left(\frac{100}{100} \right)} = 0.00144 \text{Kg Cr}$$

$$\%Cu \frac{9 \text{ Kg} \left(\frac{0.0103}{100} \right)}{\left(\frac{100}{100} \right)} = 0.000927 \text{Kg Cu}$$

$$\%Mo \frac{9 \text{ Kg} \left(\frac{0.0309}{100} \right)}{\left(\frac{100}{100} \right)} = 0.002781 \text{Kg Mo}$$

Balance para el Troquel.

$$\%C \frac{4 \text{ Kg} \left(\frac{0.068}{100} \right)}{\left(\frac{96}{100} \right)} = 0.002833 \text{Kg C}$$

$$\%Si \frac{4 \text{ Kg} \left(\frac{0.0165}{100} \right)}{\left(\frac{98}{100} \right)} = 0.000673 \text{Kg Si}$$

$$\%Mn \frac{4 \text{ Kg} \left(\frac{0.1921}{100} \right)}{\left(\frac{99}{100} \right)} = 0.007762 \text{Kg Mn}$$

$$\%S \frac{4 \text{ Kg} \left(\frac{0.0092}{100} \right)}{\left(\frac{100}{100} \right)} = 0.000368 \text{Kg S}$$

$$\%Cu \frac{4 \text{ Kg} \left(\frac{0.0261}{100} \right)}{\left(\frac{100}{100} \right)} = 0.001044 \text{Kg Cu}$$

$$\%Mo \frac{4 \text{ Kg} \left(\frac{0.039}{100} \right)}{\left(\frac{100}{100} \right)} = 0.00156 \text{Kg Mo}$$

Composición química requerida para los 28 Kg (una olla)

$$\%C \frac{28 \text{ Kg} \left(\frac{3.65}{100} \right)}{\left(\frac{96}{100} \right)} = 1.0645833 \text{Kg C}$$

$$\%Si \frac{28 \text{ Kg} \left(\frac{2.3}{100}\right)}{\left(\frac{98}{100}\right)} = 0.65271428 \text{Kg Si}$$

$$\%Mn \frac{28 \text{ Kg} \left(\frac{0.8}{100}\right)}{\left(\frac{99}{100}\right)} = 0.226263 \text{Kg Mn}$$

$$\%S \frac{28 \text{ Kg} \left(\frac{0.015}{100}\right)}{\left(\frac{100}{100}\right)} = 0.0042 \text{Kg S}$$

$$\%Cu \frac{28 \text{ Kg} \left(\frac{0.4}{100}\right)}{\left(\frac{100}{100}\right)} = 0.112 \text{Kg Cu}$$

$$\%Mo \frac{28 \text{ Kg} \left(\frac{0.5}{100}\right)}{\left(\frac{100}{100}\right)} = 0.14 \text{Kg Mo}$$

Balance para cada elemento

$$\begin{aligned} \%C &= 1.0645833 \text{Kg C} - 0.559843 \text{Kg C} - 0.012825 \text{Kg C} - 0.002833 \text{Kg C} \\ &= 0.488499 \text{Kg C} \end{aligned}$$

Agregar 488.499g de C puro (recarburante)

$$\begin{aligned} \%Si &= 0.65271428 \text{Kg Si} - 0.3872448 \text{Kg Si} - 0.000673 \text{Kg Si} - 0.02216 \text{Kg Si} \\ &= 0.24263648 \text{Kg Si} \end{aligned}$$

Agregar 242.6364g Si puro

% Mn= 0.226263Kg Mn – 0.0840909Kg Mn – 0.082455Kg Mn – 0.007762Kg

Mn = 0.0519551Kg Mn

Agregar 51.9551g Mn puro

Para el Si se le agrega Fe-Si

$$\frac{242.6364 \text{ g Si} * 100 \text{ g aleación}}{75 \text{ g Si}} = 323.5152 \text{ g de la aleación Fe – Si}$$

Para el Mn se le agrega Fe- Mn

$$\frac{51.9551 \text{ g Mn} * 100 \text{ g aleación}}{73 \text{ g Mn}} = 71.17136 \text{ g de la aleación Fe – Mn}$$

Análisis químico para la primera colada.

PRIMERA COLADA

Program: FE-22
 Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM HIERROS
 Single spark(s)

07/02/2009 12:47:27 PM

Elements: Concentration

Muestra No: C.Q.F. H.N. ADI OLLAI MONEDA1
 Usuario: JONATHAN CATALAN
 Comentario: TESIS LIC.

Quality: GRADO 100-70-03
 Analista: ADRIAN M. AMARO VILLEDA

No	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	3.601	2.254	0.773	0.0215	0.0157	0.0466	0.0773	0.0325	0.0160
2	3.617	2.279	0.778	0.0216	0.0142	0.0472	0.0778	0.0344	0.0145
3	3.611	2.269	0.778	0.0213	0.0129	0.0470	0.0778	0.0340	0.0153
4	3.627	2.272	0.772	0.0241	0.0150	0.0465	0.0772	0.0335	0.0158

No	Co	Cu	Nb	Ti	V	Pb	Mg	Fe
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.0054	0.3792	0.0086	0.0053	0.0100	0.0025	0.0335	92.3
2	0.0059	0.3919	0.0090	0.0053	0.0101	0.0024	0.0339	92.3
3	0.0056	0.3919	0.0090	0.0053	0.0101	0.0026	0.0344	92.3
4	0.0054	0.3923	0.0089	0.0053	0.0101	0.0025	0.0325	92.3

Program: FE-22
 Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM HIERROS
 Average and RSD (n=4)

07/02/2009 12:47:27 PM

Elements: Concentration

Muestra No: C.Q.F. H.N. ADI OLLAI MONEDA1
 Usuario: JONATHAN CATALAN
 Comentario: TESIS LIC.

Quality: GRADO 100-70-03
 Analista: ADRIAN M. AMARO VILLEDA

	C	Si	Mn+	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
↓	3.500	2.200							
x	3.614	2.269	0.775	0.0221	0.0145	0.0468	0.0708	0.0336	0.0154
↑	3.800	2.482	0.600	0.0500	0.1500				
s	0.0109	0.0108	0.0029	0.0013	0.0012	0.0003	0.0032	0.0008	0.0007
sr	0.303	0.475	0.374	5.976	8.230	0.745	0.665	2.471	4.258
		6.4							
	Co	Cu	Nb	Ti	V	Pb	Mg	Fe	
	%	%	%	%	%	%	%	%	
↓									
x	0.0056	0.3888	0.0089	0.0053	0.0101	0.0025	0.0336	92.3	
↑									
s	0.0003	0.0064	0.0002	0.0000	0.0001	0.0001	0.0008	0.0254	
sr	4.739	1.652	2.075	0.667	0.682	3.789	2.357	0.027	

CE=4.32

ANEXO 2

Balance de carga para la segunda Fusión

Hierro Nodular Clase 120-90-02 Matriz 100% Perlita

28 Kg olla

Composición química del Noduloy.

Fe= 48.9%

Si = 44.87%

Mg = 6.34%

Composición requerida de Magnesio Mg=0.05%

$$\frac{28Kg * \left(\frac{0.05}{100}\right)}{\left(\frac{45}{100}\right)} = 0.03111Kg = 31.111g Mg$$

Regla de 3

100g Aleación ----- 6.34g Mg

X ----- 31.111g Mg

$$31.111g Mg * \left(\frac{100g aleación}{6.34g Mg}\right) = 490.712g de aleación (noduloy)$$

Balance para el Silicio (lo que aporta noduloy)

$$\frac{490.712g de aleación * \left(\frac{44.87}{100}\right)}{\frac{98}{100}} = 224.67g Si = 0.22467Kg Si$$

$$0.22467Kg Si * \left(\frac{100}{28}\right) = 0.802413 \% Si aporta el noduloy$$

Elemento crítico el Si. Composición química requerida del Si = 2.3% de Si

%Si = 2.3% - 0.802413%(Noduloy) = 1.49759% Si (requerido)

Composición obtenida de un balance previo.

15 Kg de Hierro nodular obtenido de la primera colada.

9 Kg Chatarra estructural

4 Kg Troquel

Balance para el hierro nodular utilizada de la primera colada.

$$\%C \frac{15 \text{ Kg} \left(\frac{3.569}{100} \right)}{\left(\frac{96}{100} \right)} = 0.557656 \text{Kg C}$$

$$\%Si \frac{15 \text{ Kg} \left(\frac{2.36}{100} \right)}{\left(\frac{98}{100} \right)} = 0.361224 \text{Kg Si}$$

$$\%Mn \frac{15 \text{ Kg} \left(\frac{0.775}{100} \right)}{\left(\frac{99}{100} \right)} = 0.117424 \text{Kg Mn}$$

$$\%S \frac{15 \text{ Kg} \left(\frac{0.0194}{100} \right)}{\left(\frac{100}{100} \right)} = 0.00216 \text{Kg S}$$

$$\%Cr \frac{15 \text{ Kg} \left(\frac{0.0476}{100} \right)}{\left(\frac{100}{100} \right)} = 0.00714 \text{Kg Cr}$$

$$\%Cu \frac{15 \text{ Kg} \left(\frac{0.3982}{100} \right)}{\left(\frac{100}{100} \right)} = 0.05973 \text{Kg Cu}$$

Balance Para chatarra estructural

$$\%C \frac{9 \text{ Kg} \left(\frac{0.1368}{100} \right)}{\left(\frac{96}{100} \right)} = 0.012825 \text{Kg C}$$

$$\%Si \frac{9 \text{ Kg} \left(\frac{0.2413}{100} \right)}{\left(\frac{98}{100} \right)} = 0.02216 \text{Kg Si}$$

$$\%Mn \frac{9 \text{ Kg} \left(\frac{0.907}{100} \right)}{\left(\frac{99}{100} \right)} = 0.082455 \text{Kg Mn}$$

$$\%S \frac{9 \text{ Kg} \left(\frac{0.0037}{100} \right)}{\left(\frac{100}{100} \right)} = 0.000333 \text{Kg S}$$

$$\%Cr \frac{9 \text{ Kg} \left(\frac{0.016}{100} \right)}{\left(\frac{100}{100} \right)} = 0.00144 \text{Kg Cr}$$

$$\%Cu \frac{9 \text{ Kg} \left(\frac{0.0103}{100} \right)}{\left(\frac{100}{100} \right)} = 0.000927 \text{Kg Cu}$$

$$\%Mo \frac{9 \text{ Kg} \left(\frac{0.0309}{100} \right)}{\left(\frac{100}{100} \right)} = 0.002781 \text{Kg Mo}$$

Balance para el Troquel

$$\%C \frac{4 \text{ Kg} \left(\frac{0.068}{100} \right)}{\left(\frac{96}{100} \right)} = 0.002833 \text{Kg C}$$

$$\%Si \frac{4 \text{ Kg} \left(\frac{0.0165}{100} \right)}{\left(\frac{98}{100} \right)} = 0.000673 \text{Kg Si}$$

$$\%Mn \frac{4 \text{ Kg} \left(\frac{0.1921}{100} \right)}{\left(\frac{99}{100} \right)} = 0.007762 \text{Kg Mn}$$

$$\%S \frac{4 \text{ Kg} \left(\frac{0.0092}{100} \right)}{\left(\frac{100}{100} \right)} = 0.000368 \text{Kg S}$$

$$\%Cr \frac{4 \text{ Kg} \left(\frac{0.0166}{100} \right)}{\left(\frac{100}{100} \right)} = 0.000664 \text{Kg Cr}$$

$$\%Cu \frac{4 \text{ Kg} \left(\frac{0.0261}{100} \right)}{\left(\frac{100}{100} \right)} = 0.001044 \text{Kg Cu}$$

$$\%Mo \frac{4 \text{ Kg} \left(\frac{0.039}{100} \right)}{\left(\frac{100}{100} \right)} = 0.00156 \text{Kg Mo}$$

Composición química requerida para los 28 Kg (una olla)

$$\%C \frac{28 \text{ Kg} \left(\frac{4.1}{100} \right)}{\left(\frac{96}{100} \right)} = 1.19583 \text{Kg C}$$

$$\%Si \frac{28 \text{ Kg} \left(\frac{1.49759}{100} \right)}{\left(\frac{98}{100} \right)} = 0.427883 \text{Kg Si}$$

$$\%Mn \frac{28 \text{ Kg} \left(\frac{0.8}{100} \right)}{\left(\frac{99}{100} \right)} = 0.226263 \text{Kg Mn}$$

$$\%S \frac{28 \text{ Kg} \left(\frac{0.015}{100} \right)}{\left(\frac{100}{100} \right)} = 0.0042 \text{Kg S}$$

$$\%Cr \frac{28 \text{ Kg} \left(\frac{0.75}{100} \right)}{\left(\frac{100}{100} \right)} = 0.21 \text{Kg C}$$

$$\%Cu \frac{28 \text{ Kg} \left(\frac{0.4}{100} \right)}{\left(\frac{100}{100} \right)} = 0.112 \text{Kg Cu}$$

Balance para cada elemento

$$\begin{aligned} \%C &= 1.19583 \text{Kg C} - 0.557656 \text{Kg C} - 0.012825 \text{Kg C} - 0.002833 \text{Kg C} \\ &= 0.622516 \text{Kg C} \end{aligned}$$

Agregar 622.616 g de C puro (recarburante)

$$\begin{aligned} \%Si &= 0.427883 \text{Kg Si} - 0.361224 \text{Kg Si} - 0.000673 \text{Kg Si} - 0.02216 \text{Kg Si} = \\ &= 0.043826 \text{Kg Si} \end{aligned}$$

Agregar 43.826g Si puro

$$\begin{aligned} \%Mn &= 0.226263 \text{Kg Mn} - 0.117424 \text{Kg Mn} - 0.082455 \text{Kg Mn} - 0.007762 \text{Kg Mn} \\ &= 0.018622 \text{Kg Mn} \end{aligned}$$

Agregar 18.622g Mn puro

$$\%Cr = 0.21\text{Kg Cr} - 0.00714\text{Kg Cr} - 0.00144\text{Kg Cr} - 0.000664\text{Kg Cr} = 0.2 \text{ Kg Cr}$$

Agregar 200g Cr puro

Para el Si se le agrega Fe-Si

$$\frac{43.826 \text{ g Si} * 100 \text{ g aleación}}{75 \text{ g Si}} = 73.8769 \text{ g de la aleación Fe - Si}$$

Para el Mn se le agrega Fe- Mn

$$\frac{18.622 \text{ g Mn} * 100 \text{ g aleación}}{73 \text{ g Mn}} = 25.767 \text{ g de la aleación Fe - Mn}$$

Para el Cr se le agrega Fe- Cr

$$\frac{200 \text{ g Cr} * 100 \text{ g aleación}}{60 \text{ g Cr}} = 333.333 \text{ g de la aleación Fe - Cr}$$

Para el Mo se le agrega Fe - Mo

$$\frac{61.829 \text{ g Mo} * 100 \text{ g aleación}}{71.11 \text{ Mo}} = 86.948 \text{ g de la aleación Fe - Mo}$$

Análisis químico segunda colada

SEGUNDA COLADA BUENA

Program: FE-22

09/04/2009 03:42:27 PM

Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM HIERROS

Single spark(s)

Elements: Concentration

Muestra No: HN 0.75Cr 0.5 Mo olla 1

Quality:

Usuario: Jonathan Catalan Calderon

Analista: Adrian Manuel Amaro Villeda

Comentario: Tesis Lic.

No	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	3.731	2.468	0.755	0.0165	0.0117	0.751	0.0117	0.0433	0.0121
2	3.651	2.444	0.755	0.0166	0.0124	0.752	0.0124	0.0425	0.0116
3	3.581	2.475	0.748	0.0162	0.0111	0.754	0.0111	0.0420	0.0114
4	3.549	2.392	0.749	0.0173	0.0122	0.751	0.0122	0.0401	0.0108

No	Co	Cu	Nb	Ti	V	Pb	Mg	Fe
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.0079	0.3866	0.0088	0.0058	0.0118	0.0027	0.0255	91.3
2	0.0077	0.3814	0.0088	0.0059	0.0118	0.0026	0.0231	91.4
3	0.0079	0.3816	0.0088	0.0059	0.0117	0.0028	0.0225	91.4
4	0.0068	0.3830	0.0090	0.0060	0.0117	0.0025	0.0224	91.5

Program: FE-22

09/04/2009 03:42:27 PM

Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM HIERROS

Average and RSD (n=4)

Elements: Concentration

Muestra No: HN 0.75Cr 0.5 Mo olla 1

Quality:

Usuario: Jonathan Catalan Calderon

Analista: Adrian Manuel Amaro Villeda

Comentario: Tesis Lic.

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
\bar{x}	3.628	2.445	0.752	0.0166	0.0118	0.0734	0.0118	0.0420	0.0115
s	0.0807	0.0373	0.0052	0.0005	0.0006	0.0011	0.0085	0.0014	0.0006
sr	2.224	1.526	0.455	2.806	4.847	0.147	1.712	3.224	4.935

	Co	Cu	Nb	Ti	V	Pb	Mg	Fe
	%	%	%	%	%	%	%	%
\bar{x}	0.0076	0.3832	0.0088	0.0059	0.0118	0.0027	0.0234	91.4
s	0.0005	0.0024	0.0001	0.0001	0.0000	0.0002	0.0015	0.106
sr	7.085	0.630	1.062	1.426	0.170	5.637	6.228	0.116

ANEXO 3

Balance de carga para la tercer Fusión

Hierro Nodular Clase 120-90-02 Matriz 100% Perlita

28 Kg olla

Composición química del Noduloy

Fe= 48.9%

Si = 44.87%

Mg = 6.34%

Composición requerida de Magnesio Mg=0.05%

$$\frac{28Kg * \left(\frac{0.05}{100}\right)}{\left(\frac{45}{100}\right)} = 0.03111Kg = 31.111g Mg$$

Regla de 3

100g Aleación ----- 6.34g Mg

X ----- 31.111g Mg

$$31.111g Mg * \left(\frac{100g aleación}{6.34g Mg}\right) = 490.712g de aleación (noduloy)$$

Balance para el Silicio (lo que aporta noduloy)

$$\frac{490.712g de aleación * \left(\frac{44.87}{100}\right)}{\frac{98}{100}} = 224.67g Si = 0.22467Kg Si$$

$$0.22467Kg Si * \left(\frac{100}{28}\right) = 0.802413 \% Si aporta el noduloy$$

Elemento crítico el Si; Composición química requerida del Si = 2.0% de Si

%Si = 2.0% - 0.802413%(Noduloy) = 1.197587% Si (requerido)

Composición obtenida de un balance previo.

15 Kg de hierro con Cr utilizado en la segunda colada.

9 Kg Chatarra estructural

4 Kg Troquel

Balance para el hierro con Cr utilizada de la segunda colada.

$$\%C \frac{15 \text{ Kg} \left(\frac{3.569}{100} \right)}{\left(\frac{96}{100} \right)} = 0.557656 \text{Kg C}$$

$$\%Si \frac{15 \text{ Kg} \left(\frac{2.10}{100} \right)}{\left(\frac{98}{100} \right)} = 0.32142 \text{Kg Si}$$

$$\%Mn \frac{15 \text{ Kg} \left(\frac{0.775}{100} \right)}{\left(\frac{99}{100} \right)} = 0.117424 \text{Kg Mn}$$

$$\%S \frac{15 \text{ Kg} \left(\frac{0.0194}{100} \right)}{\left(\frac{100}{100} \right)} = 0.00216 \text{Kg S}$$

$$\%Cr \frac{15 \text{ Kg} \left(\frac{0.0476}{100} \right)}{\left(\frac{100}{100} \right)} = 0.00714 \text{Kg Cr}$$

$$\%Cu \frac{15 \text{ Kg} \left(\frac{0.3982}{100} \right)}{\left(\frac{100}{100} \right)} = 0.05973 \text{Kg Cu}$$

$$\%Mo \frac{15 \text{ Kg} \left(\frac{0.4922}{100} \right)}{\left(\frac{100}{100} \right)} = 0.07383 \text{Kg Mo}$$

Balance Para chatarra estructural

$$\%C \frac{9 \text{ Kg} \left(\frac{0.1368}{100} \right)}{\left(\frac{96}{100} \right)} = 0.012825 \text{Kg C}$$

$$\%Si \frac{9 \text{ Kg} \left(\frac{0.2113}{100} \right)}{\left(\frac{98}{100} \right)} = 0.019405 \text{Kg Si}$$

$$\%Mn \frac{9 \text{ Kg} \left(\frac{0.907}{100} \right)}{\left(\frac{99}{100} \right)} = 0.082455 \text{Kg Mn}$$

$$\%S \frac{9 \text{ Kg} \left(\frac{0.0037}{100} \right)}{\left(\frac{100}{100} \right)} = 0.000333 \text{Kg S}$$

$$\%Cr \frac{9 \text{ Kg} \left(\frac{0.016}{100} \right)}{\left(\frac{100}{100} \right)} = 0.00144 \text{Kg Cr}$$

$$\%Cu \frac{9 \text{ Kg} \left(\frac{0.0103}{100} \right)}{\left(\frac{100}{100} \right)} = 0.000927 \text{Kg Cu}$$

$$\%Mo \frac{9 \text{ Kg} \left(\frac{0.0309}{100} \right)}{\left(\frac{100}{100} \right)} = 0.002781 \text{Kg Mo}$$

Balance para el Troquel.

$$\%C \frac{4 \text{ Kg} \left(\frac{0.068}{100} \right)}{\left(\frac{96}{100} \right)} = 0.002833 \text{Kg C}$$

$$\%Si \frac{4 \text{ Kg} \left(\frac{0.0165}{100} \right)}{\left(\frac{98}{100} \right)} = 0.000673 \text{Kg Si}$$

$$\%Mn \frac{4 \text{ Kg} \left(\frac{0.1921}{100} \right)}{\left(\frac{99}{100} \right)} = 0.007762 \text{Kg Mn}$$

$$\%S \frac{4 \text{ Kg} \left(\frac{0.0092}{100} \right)}{\left(\frac{100}{100} \right)} = 0.000368 \text{Kg S}$$

$$\%Cr \frac{4 \text{ Kg} \left(\frac{0.0166}{100} \right)}{\left(\frac{100}{100} \right)} = 0.000664 \text{Kg Cr}$$

$$\%Cu \frac{4 \text{ Kg} \left(\frac{0.0261}{100} \right)}{\left(\frac{100}{100} \right)} = 0.001044 \text{Kg Cu}$$

$$\%Mo \frac{4 \text{ Kg} \left(\frac{0.039}{100} \right)}{\left(\frac{100}{100} \right)} = 0.00156 \text{Kg Mo}$$

Composición química requerida para los 28 Kg

$$\%C \frac{28 \text{ Kg} \left(\frac{4.1}{100} \right)}{\left(\frac{96}{100} \right)} = 1.19583 \text{Kg C}$$

$$\%Si \frac{28 \text{ Kg} \left(\frac{1.197587}{100} \right)}{\left(\frac{98}{100} \right)} = 0.3421677 \text{Kg Si}$$

$$\%Mn \frac{28 \text{ Kg} \left(\frac{0.8}{100}\right)}{\left(\frac{99}{100}\right)} = 0.226263 \text{Kg Mn}$$

$$\%S \frac{28 \text{ Kg} \left(\frac{0.015}{100}\right)}{\left(\frac{100}{100}\right)} = 0.0042 \text{Kg S}$$

$$\%Cr \frac{28 \text{ Kg} \left(\frac{0.75}{100}\right)}{\left(\frac{100}{100}\right)} = 0.21 \text{Kg C}$$

$$\%Cu \frac{28 \text{ Kg} \left(\frac{0.4}{100}\right)}{\left(\frac{100}{100}\right)} = 0.112 \text{Kg Cu}$$

$$\%Mo \frac{28 \text{ Kg} \left(\frac{0.5}{100}\right)}{\left(\frac{100}{100}\right)} = 0.14 \text{Kg Mo}$$

Balance para cada elemento

$$\%C = 1.19583 \text{Kg C} - 0.557656 \text{Kg C} - 0.012825 \text{Kg C} - 0.002833 \text{Kg C} \\ = 0.622516 \text{Kg C}$$

Agregar 622.616 g de C puro (recarburante)

$$\%Si = 0.3421677 \text{Kg Si} - 0.3408335 \text{Kg Si} - 0.000673 \text{Kg Si} - 0.019405 \text{Kg Si} = \\ 0.000661 \text{Kg Si}$$

Agregar 0.661128g Si puro

$$\%Mn = 0.226263 \text{Kg Mn} - 0.117424 \text{Kg Mn} - 0.082455 \text{Kg Mn} - 0.007762 \text{Kg Mn} \\ = 0.018622 \text{Kg Mn}$$

Agregar 18.622g Mn puro

$$\%Cr = 0.21 \text{Kg Cr} - 0.00714 \text{Kg Cr} - 0.00144 \text{Kg Cr} - 0.000664 \text{Kg Cr} = 0.2 \text{Kg Cr}$$

Agregar 200g Cr puro

$$\% \text{ Mo} = 0.14\text{Kg Mo} - 0.07373\text{Kg Mo} - 0.002781\text{Kg Mo} - 0.00156\text{Kg Mo} = 0.061829\text{Kg Mo}$$

Agregar 61.829g Mo puro

Para el Si se le agrega Fe-Si

$$\frac{0.661128\text{g Si} * 100\text{ g aleación}}{75\text{g Si}} = \mathbf{0.881504\text{ g de la aleación Fe - Si}}$$

Para el Mn se le agrega Fe- Mn

$$\frac{18.622\text{ g Mn} * 100\text{ g aleación}}{73\text{g Mn}} = \mathbf{25.767\text{ g de la aleación Fe - Mn}}$$

Para el Cr se le agrega Fe- Cr

$$\frac{200\text{ g Cr} * 100\text{ g aleación}}{60\text{g Cr}} = \mathbf{333.333\text{ g de la aleación Fe - Cr}}$$

Para el Mo se le agrega Fe - Mo

$$\frac{61.829\text{ g Mo} * 100\text{ g aleación}}{71.11\text{ Mo}} = \mathbf{86.948\text{ g de la aleación Fe - Mo}}$$

Análisis químico tercera colada

Program: FE-22
 Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM HIERROS
 Single spark(s)

09/29/2009 04:15:54 PM

Elements: Concentration

Muestra No: OLLA 1 MONEDA 1
 Usuario: JONATHAN
 Comentario: HIERRO NODULAR CON CARBUROS

Quality:
 Analista: ADRIAN AMARO / MAURICIO PLATA

No	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	3.610	1.903	0.775	0.0172	0.0122	0.799	0.4757	0.0398	0.0131
2	3.605	1.904	0.773	0.0171	0.0114	0.801	0.4832	0.0391	0.0127
3	3.610	1.920	0.780	0.0156	0.0110	0.802	0.4745	0.0408	0.0137

No	Co	Cu	Nb	Ti	V	Pb	Mg	Fe
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.0068	0.3890	0.0087	0.0047	0.0111	0.0027	0.0375	91.9
2	0.0063	0.3848	0.0084	0.0048	0.0112	0.0026	0.0373	91.9
3	0.0071	0.3834	0.0084	0.0047	0.0109	0.0027	0.0346	91.9

Program: FE-22
 Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM HIERROS
 Average and RSD (n=3)

09/29/2009 04:15:54 PM

Elements: Concentration

Muestra No: OLLA 1 MONEDA 1
 Usuario: JONATHAN
 Comentario: HIERRO NODULAR CON CARBUROS

Quality:
 Analista: ADRIAN AMARO / MAURICIO PLATA

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
\bar{x}	3.609	1.909	0.776	0.0166	0.0115	0.800	0.4778	0.0399	0.0132
s	0.0030	0.0097	0.0036	0.0009	0.0006	0.0015	0.0047	0.0008	0.0005
sr	0.083	0.509	0.461	5.485	5.105	0.182	0.985	2.127	3.618

	Co	Cu	Nb	Ti	V	Pb	Mg	Fe
	%	%	%	%	%	%	%	%
\bar{x}	0.0067	0.3857	0.0085	0.0047	0.0111	0.0027	0.0365	91.9
s	0.0004	0.0029	0.0002	0.0000	0.0001	0.0001	0.0016	0.0095
sr	5.786	0.764	2.283	0.978	1.019	2.605	4.516	0.010

ANEXO 4

Determinación del modulo de solidificación de la placa y la esfera

Para la esfera:

$$Vol = \frac{4}{3}\pi r^3$$

$$M = \frac{Volumen}{Area}$$

$$Area = 4\pi r^2$$

Diámetro = 7.62 cm

Radio = 3.81cm

$$Vol = \frac{4}{3}\pi(3.81\text{cm})^3 = 231.667\text{cm}^3$$

$$Area = 4\pi(3.81\text{cm})^2 = 182.415\text{cm}^2$$

$$M = \frac{231.667\text{cm}^3}{182.415\text{cm}^2} = 1.27\text{cm}$$

Para la placa:

$$Vol = Longitud * Altura * Espesor$$

$$Area = 2(Longitud * Altura) + 2(Espesor * Altura) + 2(Longitud * Espesor)$$

Longitud = 27.5cm

Altura = 14cm

Espesor = 3.5cm

$$Vol = 27.5\text{cm} * 14\text{cm} * 3.5\text{cm} = 1347.5\text{cm}^3$$

$$Area = (2 * (27.5 * 14)) + (2 * (3.5 * 14)) + (2 * (27.5 * 3.5)) = 1060.5 \text{ cm}^2$$

$$M = \frac{1347.5\text{cm}^3}{1060.5\text{cm}^2} = 1.2706\text{cm}$$

BIBLIOGRAFIA

1. William F. Smith "Fundamentos de la ciencia y ingeniería de los materiales" 2006, pp. 363-366, 430-458.
2. John R. Keough, PE y Kathy L. Hayrynen, PhD "Carbide Austempered hierro dúctil (CADI) "2000.
3. "Resistente al desgaste de hierro dúctil", Patentes de EE.UU. Publicado el 10 de julio, 2001.
4. Loper, Carl R., "The Origin of Ductile Iron", Foundry MyT, November 1994, pp 32-34.
5. Hans, J. H., "Comparing Seven Methods for producing Ductile Iron", Foundry MyT, 1987, pp 38-41.
6. Mohla, Prem P., "New Ductile Iron Process Meets The Challenge of the 1990" Foundry MyT, April 1993, pp 52-56.
7. Alagarsamy, A., "Ductile Iron Treatment Ladle for the Production of Ductile Iron", AFS Transactions, Vol. 40, 1992, pp 235-238.
8. Hachtman, Robert L., "Kulp Foundry Finding Success with Ductile Iron", Modern Casting, October 1983, pp 24-27.
9. Brewster, W. D., "Survey on Ductile Iron Practice in U.S.", Modern Casting, June, 1989, pp 39-42.
10. Hans, J. H., "Desulfurizing and Treating Ductile Iron part II", Foundry MyT, October, 1985, pp 54-57.
11. Anderson, D. Benn, "Covered Treatment ladle for the production of Ductile Iron", AFS Transactions, Vol. 145, 1982, pp 159-165.
12. Dieter, H. Gumbinger y Michael Korff, "Mg Wire Treatment of Ductile Iron", Modern Casting, February, 1988, pp 40-41.
13. Rotella, J. y Mickelson, R., "Using Cored Wire in the production of Ductile Iron", AFS Transactions, Vol. 69, 1991, pp 519-523.
14. Navarro López José, "Proceso Flotret para fabricación de hierro nodular", Moldeo y Fundición, No. 49, 1987, pp. 8-14.

15. Lui, S. L. y N. X. Ding. "Effect of type and Amount of Treatment Alloy on Compacted Graphite Produced by Hot-chamber Process", AFS Transactions, Vol. 99, 1985, pp. 650-675.
16. Kirginm, Kenneth H., "Ductile Iron to Spur Ferrous Casting Recovery", Modern Casting January, 1993, pp. 26-28.
17. Peng, Y. y Yang M., "Influence of the Mold Chamber Design on Dross Formation in Ductile Iron Casting", AFS transactions, Vol. 173, 1987, pp. 653-664.
18. Prucha, Thomas E., "Gating for the In-the- Mold Process", Modern Casting, February, 1982, pp. 38-42.
19. Weese, P.P. Mohla, "In-the- Mold Process Innovations: A Case History", AFS Transactions, Vol. 103, 1995, pp. 15-19.
20. Fowler, J. y Stefanescu, D. M., "Production of Ferritic and Perlitic Grades of Compacted Graphite Cast Iron by the In- Mold Process", AFS Transactions, Vol. 60, 1984, pp. 361-372.
21. Dunks, C. M., "In the Mold Worldwide Today and Tomorrow", AFS Transactions, Vol. 83, 1982, pp. 551-556.
22. Davis, K. G. y Ding H., "In Mold Productions of Ductile Iron In Permanent Moulds", Advanced Casting Technology, ASM International, USA, 1986, pp. 221-230.
23. American Foundrymen's Society Inc., "Ductile Iron Handbook, Ed. AFS, USA 1992, pp 1-19.
24. Jiyang, W. Schmitz, "Formation of Austenite Shell Around Nodular Graphite and Its Effect on Deterioration of Graphite", AFS Transactions, Vol. 23 1990, pp783-786.
25. José, Apraiz. Barreiro. "Fabricación de los Hierros, Aceros y Fundiciones" Tomo I, Tomo 2. URMO, S. A. DE EDICIONES, 1978 pp 197,227, 372-373.
26. American Foundrymens Society, Inc. "Foundrymens guide to ductile iron microstructures" Des Plaines, Illinois, 1984, pp 14-16, 18-21, 24-26, 28-31, 36-39, 41-48.