



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

**OBTENCIÓN DE UN HIERRO NODULAR GRADO
100-70-03 MEDIANTE UN CONVERTIDOR CON CAMARA
FALSA DE REACCIÓN UTILIZANDO DIFERENTES
NODULARIZANTES: FE-SI-6.42% Mg Y FE-SI-8.5% Mg**

T E S I S

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

P R E S E N T A

SAÚL ARELLANO ESCOBAR

MEXICO, D.F.

AÑO 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: Prof. Sergio García Galán

Vocal: Prof. Arturo Alejandro Sánchez Santiago

Secretario: Prof. Adrian Manuel Amaro Villeda

1er Suplente: Prof. Balbina Ojeda Ramírez

2° Suplente: Prof. Eusebio Cándido Atlatenco Tlapanco

Sitio donde se desarrolló el tema:

LABORATORIO 009 "FUNDICIÓN" EDIFICIO "D",
FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM

Asesor del tema:

M.C ADRIAN MANUEL AMARO VILLEDA

Supervisor Técnico:

Ing. EUSEBIO CANDIDO ATLATENCO TLAPANCO

Sustentante:

SAÚL ARELLANO ESCOBAR

El Dios de mi misericordia irá delante de mí Sal. 59:10^a

Ten confianza; levántate, te llama. Mr. 10:49 c

Y toda la tierra sabrá que hay Dios en Israel. 1P. 17:46

Todo lo puedo en Cristo que me fortalece Fil. 4:13

AGRADECIMIENTOS

El mayor agradecimiento es para ti mi Dios, por que con poder y gloria me ayudaste a concluir y ver lo que ya me habías dado, gracias por darme la fuerza y valentía para ponerme de pie cuando mas lo necesite, gracias por estar siempre a mi lado, por tu amor, por tu misericordia, por tu fidelidad, por tu paciencia, por mostrarme tus sueños que son mas grandes que los míos, por guardarme como a la niña de tus ojos y por permitirme conocerte cada día mas, pero antes de ser profesionista quiero ser siempre tu hijo por que es el mayor privilegio que cualquier titulo de la tierra.

A mi maestro Jesús, por impactar mi vida, por ser mi refugio y mi fortaleza gracias por haberme sacado del pozo en el que estaba y ensanchar mi territorio me has dado la verdadera razón de vivir.

Al Espíritu Santo por que ahora se que eres real, has iluminado y guiado mi caminar, junto a ti la victoria sabe a miel.

El sepulcro esta abierto y la cruz esta vacía.

A la Universidad Nacional Autónoma de México.

.....por permitirme ser parte de la comunidad universitaria.

A la Facultad de Química.

.....por abrirme sus puertas y darme una formación académica.

Al departamento de Metalurgia edificio "D"

.....por formarme como profesionista.

A mis profesores de la Facultad de Química

M.C Adrián Manuel Amaro, Ing. Cándido Atlatenco, † M.C Ignacio Beltrán, Ing. Juan de la Rosa, M.C Antonio Huerta, Ing. Arturo Sánchez, Dr. José Antonio Barrera, Ing. Balbina Ojeda, Dr. Héctor Cruz, M.C Agustín Tamayo, M.C Héctor Vergara, M.C Sergio Téllez, M.C Benjamín Beltrán, Dra. Sobeida.

.....*que de ellos siempre recibí lo mejor.*

A mis familiares:

A mi abuelitos † Clemente Escobar y Francisca flores.

.....*gracias por ser como son y quererme mucho.*

A mi Tía Marisela y mis primas Lani, Jhosi y chivis.

.....*gracias por ser mi familia.*

A mi Tío Arturo León y mi primo Raymundo.

A mi Tío Alejandro y mis primos Carlos, Alejandro y Valeria.

A mi padrino † José Sandoval y mi madrina Lupe.

.....*por su gran apoyo con mi familia pero en especial con mi pápa.*

A Raúl Muños y Rocío B.

.....*por su amor y su insistencia en mi vida.*

A Casa Sobre la Roca pero en especial a:

Ricardo y Raquel Pineda.

.....*por su hermoso ejemplo de vida.*

A Diego y Gaby Gallegos.

.....*por su amistad, tiempo y dedicación los quiero mucho.*

A la familia Rincón:

Mama Ufe, Carlos Camarena, Malena, Carlita, Paty, Lalo, Fer.

.....*por ser mi nueva familia y por apoyar a mi familia cuando mas los necesitamos.*

A la familia Carrillo Ortega:

Ale, Clau, Paty, Sra. Luisa y mi amigo Toño.

.....*por ser su aprecio a mi familia y su valiosa amistad.*

A Cristi por tu hermosa familia que has formado con tu esposo y tus valiosos hijos Anita, Víctor y Victoria.

A mis amigos de casa:

Diego, Cesar, Adrián, Carlita, Clau, Nancy, Lore, Ananké, Irene, Anita, Denis y Poncho.

.....*por su amistad invaluable.*

A mis amigos:

Hugo, Edilson, Diego, Oswaldo, Israel, Toño, Ramón, Ángel, Carlos Sayayin.

Marcos, Cristian Rosey, Francisco, Pedro, Rubén, Arnulfo, Juan y Betzabe.

Paulina, Lucero, Jazmín, Marlon, Nancy, Alex Urzua, Daniel, Juan Carlos.

Chucho, Chelino, Choreño, Gabo, Adrián Mejía, Vilchis, Oscar Emilio, Nancy, Fabiola, Liz, Leti, Santa, Thalía, Mireyita, Cristal, Yemilet, Dhira, Amanda, Añil, Amo.

Chiquitin, Batis, Edgar, Capi, Chino, Pedro.

† Ivan, Oswaldo, Edgar, Jaime, Sergio, Memo, Jorge Fragoso, Viri, Itzel, Morua.

Mauro, Anita, Leti, Leo, Fernando, Pepe, Watts, Leo sec, Juan com, Emerson, Martell, Wallter, Cesar Alamo, David Muños, Gerardo Charcas, Jose Luis, Jhony, Andrés, Javier Martinez, Israel Orta y Don Gaby.

.....*por su amistad y compañerismo.*

A mis amigos con los que conviví la carrera de principio a fin pero en especial a:

Lucero, Marlon y Oscar Emilio.

.....*por que juntos compartimos momentos difíciles y felices en la carrera.*

A mis mejores amigas:

Nancy Rojas, Cristal, Liliana Guevara y Lucero.

.....por su amistad y gran apoyo.

A mis amigas del laboratorio 114 edificio E " en especial a:

Dra. Sobeida y Silvia.

.....por su gran amistad.

A mis amigos de fundición:

† Ivan, Oswaldo, Edgar, Jaime, Sergio Galicia, Memo, Jorge Fragoso, Viri, Itzel, Leti.

A mis mascotas:

Dingo, Bombita, Greta, Shera, Simon y Bussy.

.....por que siempre están conmigo aunque ya se me adelantaron.

Al personal de COOPER Crouse-Hinds:

Ing. Jorge Olivares, M.C Jacobo Vargas, Ing. Leobardo Ibáñez, M.C Darío Escobar, Ing. Isaac Chávez, Efraín Tepozteco, Jose Luis Bernal, Maria Eugenia García, Ing. Luis Merced

A Jacobo Vargas: Por darme la oportunidad de emprender mi formación laboral.

A Leobardo Ibáñez: Por su gran apoyo, por compartir conmigo sus conocimientos pero principalmente su amistad y compañerismo.

A Darío Escobar: Por su valioso apoyo, confianza y amistad, gracias Darío por ser mi jefe pero principalmente mi amigo.

Ing. Daniel Trinidad, Ing. Alfonso Magdaleno, Ing. Jose Lugo, Silvia Palma.

Ing. Justo Sotelo.

Ing. Martín Escobedo, Alex Escudero, Rojo, Abraham, Fer, Alejandro, Alex nava, Alex Popocatl.

Ing. Francisco Jiménez, Ing. Javier Castro, Ing. Salvador Ordóñez, Selene, Elías Valerio, Ing. Antonio

Pasaran, Ing. Pedro Mancilla, Ing. Jonathan Morales, Ing. Viridiana Alcantar, Ing. Gilberto Jiménez.

Armando Navarrete y Jaime Frías.

Lic. Israel García, Lic. María del Carmen Mora, Lic. Ana Badillo, Dr. Fausto, Lic. Gerardo Reboreda, Mari Islas.

Ing. Fernando Pineda, Ing. Juan Carreón, Consuelo Garay, Ing. Ricardo Córdoba.

Martín Frías, Ing. Constantino de Santiago, Garduñito.

A mis mejores amistades de la Facultad de Química:

Jazmín, Lucero, Marlon, Chucho, Chelino, Choreño, Gabo, Coster, Vilchis, Oscar Emilio, Nancy Rojas, Fabiola, Cristal, Liz, Santa, Thalia.

Gracias a todos y cada una de las personas que participaros en la realización de este trabajo, ya que invirtieron su tiempo y conocimientos para ayudarme a completar mi proyecto de tesis.

Por ultimo quiero a agradecer aquellas personas que sin esperar nada a cambio compartieron su gran amistad conmigo.

Dedicatorias

A mi abuelito: † Clemente Escobar Ramirez.

Por que fue motivo en mi carrera de seguir adelante, se que estas orgulloso de mi siempre me lo demostraste.

A mi Mama: Teresa Escobar Flores.

Nunca será suficientemente agradecimiento por lo que has hecho por mí, por darme la vida y depositarme tu confianza para seguir con mis sueños, eres lo más importante en mi vida sin ti y sin polonchis no hubiese terminado nada, gracias mamá.

A mi queridísima hermana: Paola.

Por que no solo eres mi hermana, sino mi amiga y la mejor consejera en los momentos mas difíciles, estoy endeuda contigo, eres un maravilloso ejemplo a seguir me asombra tu valentía de cómo enfrentas las cosas y de cómo te dejas llevar por Dios.

A mi Pápa: Pablo Arellano Galicia.

Por que me enseñaste el valor de la vida que dentro de tus preocupaciones me diste la posibilidad de brillar

A Mi Hermano: Henry.

Por que la vida nos puso en esta situación donde te agradezco por ser mi hermano mayor.

A Irías Ramirez Bedolla.

Por que dentro de tu sonrisa aprendí que la vida esta llena de felicidad y amor, siempre he recibido de ti aceptación y cariño, te valoro te agradezco, eres especial y sobre todo te quiero muchísimo.

A tu lado soy muy feliz.

A mi único y verdadero amigo fiel Israel Martínez Urrutia

Por que muchas páginas de mi vida estarían vacías si no hubiera sido por tu amistad.



CONTENIDO

	Pág.
Contenido.....	I
Índice de tablas.....	IV
Índice de figuras.....	VII
Introducción.....	VIII
Objetivos.....	IX

CAPITULO I ANTECEDENTES TEÓRICOS

CONTENIDO.

1.1 Materiales fabricados de hierro nodular.....	1
1.2 Aplicaciones del hierro nodular y ventajas.....	3

CAPITULO II FUNDAMENTOS TEORICOS

CONTENIDO.

2.1 Clasificación de las fundiciones.....	4
Fundición Nodular	
2.2 Efecto de los elementos aleantes.....	9
2.3 Procesos de fabricación del hierro Nodular.....	14
Grupo 1 Proceso que utiliza olla de tratamiento para la nodularización.	
Grupo 2 Proceso donde la nodularización es en el chorro de vaciado.	
Grupo 3 Proceso que se realiza dentro del molde (In-Mold).	
Grupo 4 Proceso en el que emplean convertidores semicontinuos.	
Grupo 5 Proceso donde el sistema es presurizado.	
2.4 Efecto del Inoculante.....	17
2.5 Nodularización.....	18



	Pág.
2.6 Tipos de hierro nodular.....	19
Hierro Nodular Ferrítico.	
Hierro Nodular Perlítico.	
Hierro Nodular Perlítico-Ferrítico.	
Hierro Nodular Martensítico.	
Hierro Nodular Austenítico.	
2.7 Caracterización de los hierros nodulares.....	21
CAPITULO III PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	
CONTENIDO.	
3.1 Diseño experimental.....	24
3.2 Equipo y material.....	26
3.3 Proceso de mantenimiento e implementación de materiales.....	27
3.3.1 Placa modelo.	
3.3.2 Fabricación de moldes de arena en verde.	
3.3.3 Materia prima chatarra de hierro y acero.	
3.3.4 Equipo para el muestreo de metal para análisis químico.	
3.3.5 Elaboración de tapones de fibra de vidrio.	
3.3.6 Varillas para limpieza de escoria.	
3.3.7 Mantenimiento e implementación en el convertidor.	
3.4 Etapa 1 Fabricación de hierro nodular grado 100-70-03.....	32
Balance de carga de 72 Kilogramos con el nodularizante Noduloy R6.	
Ajuste de elementos de acuerdo al balance de carga.	
3.5 Etapa 2 Fabricación de hierro nodular grado 100-70-03.....	42
Balance de carga de 57 Kilogramos con el nodularizante Noduloy R9.	
Ajuste de elementos de acuerdo al balance de carga.	



	Pág.
3.6 Etapa 3 Corte, desbaste y preparación metalográfica para la caracterización de las piezas.....	51
3.7 Etapa 4 Evaluación metalográfica de las piezas.....	53
CAPITULO IV RESULTADOS	
CONTENIDO.	
4.1 Composición química final con el nodularizante Noduloy R6.....	56
4.2 Porcentaje de magnesio recuperado con el nodularizante Noduloy R6.....	57
4.3 Composición química final con el nodularizante Noduloy R9.....	59
4.4 Porcentaje de magnesio recuperado con el nodularizante Noduloy R9.....	60
4.5 Replicas metalográficas.....	62
4.5.1 Experimento con el nodularizante Noduloy R6.	
4.5.2 Experimento con el nodularizante Noduloy R9.	
4.6 Evaluación metalográfica de piezas fabricadas con el nodularizante Noduloy R6.....	72
4.7 Evaluación metalográfica de piezas fabricadas con el nodularizante Noduloy R9.....	73
CAPITULO V ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	74
CAPITULO VI CONCLUSIONES.....	78
BIBLIOGRAFÍA.....	77



INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla No. 1.....	18
Composición química de los nodularizantes.	
Tabla No. 2.....	21
Relación de propiedades de acuerdo a la ASTM A-536.	
Tabla No. 3.....	22
Características de los diferentes grados de hierro nodular.	
Tabla No. 4.....	22
Composición química de los diferentes tipos de grados de hierro nodular.	
Tabla No. 5.....	23
Propiedades mecánicas de los diferentes tipos de grados de hierro nodular en función de su matriz y un tratamiento térmico.	
Tabla No.6.....	25
Dimensiones de las piezas de hierro nodular en forma de placa.	
Tabla No.7.....	27
Dimensiones del sistema de colada.	
Tabla No.8.....	28
Características de la arena de moldeo en verde.	
Tabla No.9.....	37
Composición química de las chatarras de hierro y acero que se utilizaron en la fusión del hierro nodular grado 100-70-03 con el nodularizante Noduloy R6.	
Tabla No.10.....	40
Relación de los materiales que se suministraron durante la fusión del hierro nodular con el nodularizante Noduloy R6.	



	Pág.
Tabla No.11.....	41
Composición química preliminar de la colada con el nodularizante Noduloy R6.	
Tabla No.12.....	46
Composición química de las chatarras de hierro y acero que se utilizaron en la fusión del hierro nodular grado 100-70-03 con el nodularizante Noduloy R9.	
Tabla No.13.....	49
Relación de los materiales que se suministraron durante la fusión del hierro nodular con el nodularizante Noduloy R9.	
Tabla No.14.....	50
Composición química preliminar de la colada con el nodularizante Noduloy R9.	
Tabla No.15.....	53
Identificación de piezas del experimento con el nodularizante Noduloy R6 para el estudio metalográfico.	
Tabla No.16.....	54
Identificación de piezas del experimento con el nodularizante Noduloy R9 para el estudio metalográfico.	
Tabla No.17.....	56
Composición química final de las coladas y temperaturas de tratamiento del experimento donde se utilizo el nodularizante Noduloy R6.	
Tabla No.18.....	58
Relación de datos para la eficiencia de magnesio recuperado en el experimento donde se utilizo el nodularizante Noduloy R6.	
Tabla No.19.....	59
Composición química final de las coladas y temperaturas de tratamiento del experimento donde se utilizo el nodularizante Noduloy R9.	



	Pág.
Tabla No.20.....	61
Relación de datos para la eficiencia de magnesio recuperado en el experimento donde se utilizo el nodularizante Noduloy R9.	
Tabla No.21.....	72
Evaluación metalográfica de las piezas fabricadas de hierro nodular en el experimento donde se utilizo el nodularizante Noduloy R6.	
Tabla No.22.....	73
Evaluación metalográfica de las piezas fabricadas de hierro nodular en el experimento donde se utilizo el nodularizante Noduloy R9.	
Tabla No.23.....	74
Composición química de magnesio final en cada colada con los nodularizantes Noduloy R6 y R9	
Tabla No.24.....	77
Eficiencia de magnesio recuperado en los experimentos donde se utilizo el nodularizante Noduloy R6 y R9.	



INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura No. 1.....	25
Piezas a fabricar de la placa modelo.	
Figura No. 2.....	30
Convertidor que se utilizo para la fabricación del hierro nodular grado 100-70-03.	
Figura No. 3.....	31
Diagrama del proceso.	
Figura No. 4.....	51
Sección cortada para análisis metalográfico.	
Figura No. 5.....	74
Efecto del porcentaje de magnesio residual en la forma del grafito precipitado.	



El trabajo presentado en esta tesis es sobre la fabricación de un hierro nodular clase 100-70-03 utilizando el método del convertidor de doble cámara.

Para la fabricación de este material, se realizó dos experimentaciones por el mismo proceso, pero en cada colada se utilizó diferente nodularizante, la primer prueba se uso un nodularizante denominado Noduloy R6 (Fe-Si-6.42% Mg) y en la segunda prueba Noduloy R9 (Fe-Si-8.5% Mg), al fabricar el hierro nodular con diferentes nodularizantes se pudo evaluar tanto el método y la eficiencia de estos nodularizantes.

Las experimentaciones se realizaron bajo el mismo método y proceso, lo único que se vario fue el nodularizante para cada caso; las fusiones se realizaron bajo las mismas condiciones de temperatura tratando de que tuviera la misma reproducibilidad en el método de fabricación. El experimento se realizó por el método del convertidor de doble cámara, en este método lo que se cambió fue el lugar donde se habría de colocar el nodularizante y esto fue en el ducto que comunica las dos cámaras.

Al material fabricado se le realizó un análisis metalográfico en donde se evaluó la densidad de nódulos, porcentaje de nódulos, tamaño del nódulo, porcentaje de carburos y tipo de matriz, todas las evaluaciones se realizaron a 100 X.

Con la evaluación metalográfica realizada se pudo definir la formación del grafito esferoidal y sí el método utilizado es eficiente para fabricar un hierro nodular clase 100-70-03, donde uno de los objetivos de esta experimentación es sobre la obtención de un hierro nodular por medio del método del convertidor utilizando diferentes nodularizantes y si este mismo proceso permite obtener un porcentaje de magnesio recuperado tal que beneficie la formación de este material.



Los objetivos del presente trabajo son:

Obtener un hierro nodular grado 100-70-03 por el método de un convertidor con cámara falsa de reacción.

Determinar el efecto de los nodularizantes [Noduloy R6 (Fe-Si-6.42% Mg) y Noduloy R9 (Fe-Si-8.5% Mg)] en la fabricación del hierro nodular grado 100-70-03 por el método de un convertidor con cámara falsa de reacción.

Identificar los factores que afectan el proceso de la fabricación del hierro nodular grado 100-70-03 por el método de un convertidor con cámara falsa de reacción.



1.1 MATERIALES FABRICADOS DE HIERRO NODULAR ¹³

Las piezas de fundición de hierros son en general más baratas que las de acero, y su fabricación es también más sencilla por emplearse instalaciones menos costosas y realizarse la fusión a temperaturas relativamente menores que las correspondientes a los aceros.

Se pueden fabricar con relativa facilidad piezas de grandes dimensiones y también piezas pequeñas y complicadas, que se pueden obtener con gran precisión de formas y medidas, siendo además en ellas mucho menos frecuentes la aparición de zonas porosas que en las piezas fabricadas con acero.

Como la temperatura de fusión de las fundiciones es menor en comparación con la de los aceros, por lo que en general suele ser bastante fácil conseguir que las fundiciones de estado líquido tengan gran fluidez, y con ello se facilita la fabricación de piezas de poco espesor. En la solidificación presentan mucha menos contracción que los aceros y además su fabricación no exige como en la de los aceros, el empleo de refractarios relativamente especiales.

En el caso particular de la fundición nodular, posee excelentes características y en muchos casos llegan a ser una gran competencia para el acero.

Los materiales producidos de una fundición nodular o esferoidal llevan un importante cambio de estructura, que desarrollan unas propiedades deseables como alta ductilidad, resistencia, buen maquinado, buena fluidez para la colada, buena dureza y tenacidad, pero no puede ser tan dura como la fundición blanca, salvo que la sometan a un tratamiento térmico, superficial y especial.

Algunas tendencias sobre los materiales utilizados para la fabricación de vehículos ligeros, muestran que los materiales utilizados tradicionalmente están siendo substituidos por otros con mejores propiedades mecánicas o tecnológicamente más avanzados. El principal motivo de la industria automotriz, para llevar a cabo estas substituciones, es el de incrementar el rendimiento de combustible a través de la disminución del peso vehicular.



El hierro nodular es un material muy empleado en el sector automotriz, ya que presenta algunas ventajas con respecto al acero o el hierro gris, como son, por ejemplo, mayor resistencia a la fatiga y mayor resistencia al desgaste, aunque con un costo de fabricación más elevado que el hierro gris. Por su buena tenacidad el hierro nodular está siendo utilizado para la fabricación de piezas que experimentan ciclos de fatiga o desgaste prolongado, como, por ejemplo, cigüeñales, monoblocks, engranes, etc. Esto es debido, al tipo de microestructura que posee, la cual inhibe el crecimiento y propagación de grietas, el tipo de morfología de los nódulos afecta a la propagación de grietas, se observa que entre mayor esfericidad de los nódulos, mayor resistencia a la propagación de grietas.

**1.2 APLICACIONES DEL HIERRO NODULAR Y VENTAJAS¹³**

Nombre de la Pieza	Material reemplazado	Ventajas
Engranajes axiales (transmisión)	<ul style="list-style-type: none">• Acero Forjado	<ul style="list-style-type: none">• Mayor Producción• Menores costos• Mejor maquinabilidad• Operación más silenciosa• Reducción de peso
Engranajes de tiempo de Motor Diesel	<ul style="list-style-type: none">• Acero 1022 Forjado	<ul style="list-style-type: none">• Reducción del 30% en costos
Cigüeñal	<ul style="list-style-type: none">• Acero Forjado	<ul style="list-style-type: none">• Menor costo• Mayor resistencia a la fatiga• Mayor Durabilidad• Reducción de peso
Disco de Embrague	<ul style="list-style-type: none">• Acero• Aluminio	<ul style="list-style-type: none">• Menor Costo• Mejor resistencia al desgaste
Engranajes de caja de transmisión	<ul style="list-style-type: none">• Acero Forjado	<ul style="list-style-type: none">• Menor costo de producción• Operación silenciosa• Reducción de peso
Calibrador del disco de frenado	<ul style="list-style-type: none">• Acero	<ul style="list-style-type: none">• Menor peso
Caja de transmisión para acoplar el árbol de levas	<ul style="list-style-type: none">• Acero	<ul style="list-style-type: none">• Mayor resistencia la desgaste• Mejor maquinabilidad• Menor peso



2.1 CLASIFICACIÓN DE LAS FUNDICIONES

La principal diferencia entre acero y hierro colado consiste en que el primero es plástico y forjable, mientras que el segundo no es lo suficientemente plástico para ser forjable a cualquier temperatura.

En los hierros el silicio juega un papel muy importante por que afecta a la estructura y propiedades del hierro, algunas veces se añaden elementos de aleación con el fin de modificar las propiedades mecánicas del hierro.

Para los hierros colados las variaciones en la composición y en la técnica de fundición empleadas en la fabricación pueden dar como resultado grandes variaciones en la estructura y propiedades físicas del metal colado.^{4,5}

Cuando no se requiere una gran resistencia a la tracción y una gran tenacidad en el acero moldeado, se utilizan las aleaciones ferrosas con mucho carbono y en las que parte o todo el carbono se encuentra en forma de grafito.¹

El comportamiento de la fundición ante la actuación de los factores que afectan a su estructura de solidificación se puede clasificar en dos grupos:

- A) Aquellos casos en que el comportamiento es completamente ortodoxo, semejante al comportamiento general de las aleaciones metálicas.
- B) Cuando el comportamiento es único, peculiar del mismo metal o atribuible a causas no bien conocidas.

En la primera categoría está comprendida la composición con respecto al carbono y al azufre y el efecto de la velocidad de enfriamiento, y ambas tienen una gran influencia sobre la estructura.

La segunda categoría pertenecen el efecto del subenfriamiento, la inoculación de elementos en pequeña proporción, como manganeso y azufre, el de los gases e inclusiones en la masa fundida y el de otros varios factores poco conocidos.¹



El mejor método para clasificar el hierro fundido es de acuerdo con su microestructura. Las variables a considerar que controlan los diferentes tipos de hierro fundido son:

- 1) El contenido de carbono.
- 2) El contenido de aleación y de impurezas.
- 3) La rapidez de enfriamiento durante y después de la solidificación, y el tratamiento térmico después de fundirse.



FUNDICION NODULAR

La fundición esferoidal se distingue por su alta resistencia, tenacidad y ductilidad, todo ello unido a excelentes características de colado y maquinado. Igualmente posee un elevado modulo de elasticidad y buena resistencia al desgaste y a la corrosión.

Recibe el nombre de fundición esferoidal dada la forma que adopta el grafito que contiene. Igualmente se le puede definir como fundición dúctil o nodular.

La diferencia de la fundición esferoidal a la fundición ordinaria es de que en esta ultima el grafito contenido esta en forma laminar, ya que en muchas de estas láminas se encuentran unidas entre si, creando discontinuidades, a la par que tensiones en todo el metal: a consecuencia de ello se produce fragilidad y poca tenacidad.

En la fundición maleable el grafito se encuentra de una manera mas agrupada y compacta, confiriéndole una tenacidad y ductilidad mas elevada en relación a la fundición ordinaria, pero para lograr que el grafito sea agrupado es necesario un tratamiento térmico muy prolongado.

En la fundición esferoidal el grafito en forma de esferoides se produce como consecuencia de la presencia de unas partículas de magnesio retenido en el hierro. Al ser eliminadas las discontinuidades de las láminas de grafito en la fundición gris, la nueva fundición esferoidal adquiere propiedades mecánicas muy elevadas. Cualquier tipo y tamaño de pieza puede ser moldeada con fundición esferoidal.^{3, 6}

En las fundiciones grises ordinarias el grafito esta repartido en la matriz metálica en forma de laminas de dimensiones y formas variadas que crean en la matriz discontinuidades que hacen a la fundición relativamente frágil y no dúctil, por el contrario la fundición nodular presenta el grafito en forma esferoidal el cual no interrumpe la matriz metálica de manera tan marcada.¹



El grafito esferoidal se consigue generalmente, por adición de un elemento desulfurante y estabilizador de la cementita, el silicio que se opone a la tendencia hacia la fundición blanca, haciendo que el grafito precipite en forma de pequeñas esferas, estos materiales añadidos a la fundición líquida poco antes de el vaciado al molde modifican la estructura, y por tanto, también las propiedades físicas y mecánicas.^{1,10}

La cantidad relativa de magnesio necesaria para producir la fundición nodular depende de la cantidad presente de azufre, debido que la primera reacción que sigue de la adición es la formación de sulfuro de magnesio. La reacción se realiza hasta que el contenido en azufre se aproxima a un 0.02%, en cuyo punto el magnesio es eficaz en el cambio de la forma del grafito.¹

Esta fundición posee una gran fluidez, lo que permite utilizarla para llenar los moldes más complejos, y unas notables características de resistencia a la oxidación.¹



Las principales aplicaciones de la fundición con grafito esferoidal son:

- 1) Para piezas moldeadas de fundición con una mejor tenacidad, un campo particular de aplicación es el de servicios de la marina, donde se exige a los materiales una gran tenacidad para resistir los choques y las tensiones normales que se producen en servicio.
- 2) Para reemplazar las piezas moldeadas de acero, debido a la mejor moldeabilidad de la fundición con grafito esferoidal que ha permitido obtener ahora ciertas piezas que no eran posibles con acero.
- 3) Par reemplazar la fundición maleable.¹

El contenido total de carbono de hierro nodular es el mismo que el hierro fundido gris. Las partículas esferoidales de grafito se forman durante la solidificación debido a la presencia de una pequeña cantidad de ciertos elementos de aleación. La adición del elemento formador de que el grafito tome la forma esferoidal es el magnesio o cerio. Como estos elementos tienen una estrecha afinidad para el azufre, el contenido de azufre de la aleación de base hierro debe ser inferior al 0.015% para que el tratamiento sea efectivo, y las aleaciones se describen como “desulfurizadas”.^{2,3}



2.2 EFECTO DE ELEMENTOS ALEANTES

SILICIO

El silicio es el elemento más importante y decisivo para hacer que el carbono se encuentre en forma de grafito en vez de cementita.¹

El silicio favorece la formación de grafito, aparte de este efecto grafitizador, produce un marcado cambio en la posición de las líneas del diagrama ordinario hierro – carbono.

Uno de los efectos mas pronunciados es un desplazamiento de la proporción de carbono correspondiente al punto eutéctico.¹

La composición eutéctica se mueve a la izquierda (aproximadamente 0.30% por cada 1% de silicio), lo cual abate efectivamente la temperatura a la cual la aleación empieza a solidificar.²

Otro efecto del silicio sobre el carbono es que tiende a formar grafito durante la solidificación.¹

El silicio incrementa la fluidez y si no esta contrabalanceado por los elementos de promoción de carburos, favorece la solidificación de acuerdo con el sistema estable hierro-grafito.^{2,7}

MANGANESO

El manganeso es un estabilizador de carburo que tiende a incrementar la cantidad de carbono combinado, pero es mucho menos potente que el azufre. Si el manganeso esta presente en la cantidad correcta para formar sulfuro de manganeso, su efecto será reducir la proporción de carbono combinado eliminando el efecto del azufre. El exceso de manganeso tiene poco efecto en la solidificación y solo retarda débilmente la grafitización primaria; sin embargo sobre la grafitización eutectoide, el manganeso es un fuerte estabilizador de carburo.²



AZUFRE

El azufre aunque no participa en la formación de carburos estabiliza químicamente la cementita. Ahora bien como el azufre tiene una gran avidez por el manganeso las primeras adiciones de azufre a una fundición con una proporción algo elevada en manganeso posee un efecto grafitizante indirecto por eliminar el manganeso que estabiliza la cementita y por el contrario, las primeras adiciones de manganeso a una fundición con una proporción no es eficaz en la formación de grafito o carburo, y así el azufre puede favorecer la grafitización.¹

El efecto del azufre sobre la forma de carbono es el contrario que el del silicio, a mayor contenido de azufre, mayor será la cantidad de carbono combinado, teniendo de esta manera a producir un hierro blanco duro y frágil.

Aparte de producir carbón combinado, el azufre tiende a reaccionar con el hierro para formar sulfuro de hierro (FeS). Este compuesto de baja temperatura de fusión presenta delgadas capas interdendríticas y aumenta la posibilidad de que haya fisuras a altas temperaturas. El azufre en grandes cantidades tiende a reducir la fluidez y suele causar cavidades (aire atrapado) en las piezas fundidas.

El manganeso tiene mayor afinidad para el azufre que el hierro, formando sulfuro de manganeso (MnS). Las partículas de sulfuro de manganeso aparecen como pequeñas inclusiones, las cuales perjudican las propiedades de la fundición.²



MAGNESIO

En todos los métodos de tratamiento de magnesio, es esencial una medición exacta del peso del metal tratado y de la cantidad adicionada. El contenido de azufre inicial del hierro y la temperatura de tratamiento deben también conocerse porque ésta influye en el contenido de magnesio final. La recuperación de magnesio en la colada se puede obtener mediante la siguiente relación.

$$\text{Recuperación} = ((\% \text{ inicial Mg}) / ((\% \text{ agregado de Mg}) - \frac{3}{4} * (\% \text{ inicial de S})))$$

Los valores típicos de recuperación a una temperatura de tratamiento de 1450°C son:

50% para una aleación de 15% Ni-Mg agregado en el cubilote.

40% para un 9% de ferro silicio-Mg agregado usando el proceso sándwich.

60% para un 5% de ferro silicio-Mg agregado usando el proceso sándwich.

50% para Mg puro agregado en el convertidor.

45% para el proceso Inmold o proceso Flotret.

El magnesio introducido en la aleación debe ser capaz de disminuir al azufre, pero además es necesario que quede un determinado contenido en el metal base (Magnesio residual donde la cantidad optima está entre 0.03 y 0.06%) que permita la nodulización del grafito en forma esferoidal.⁹

CARBONO

El carbono es sin lugar a dudas, después del hierro, el elemento más importante; se le puede encontrar combinado con el hierro (carbono combinado) en forma de carburo (o cementita con 6,67% C) o en el estado libre de grafito (carbono libre o grafitico).

Entre los factores que influyen en que el carbono se encuentre en una u otra forma están la velocidad de enfriamiento y la presencia de elementos grafitizantes. Un enfriamiento lento y la presencia de silicio, níquel, cobre, etc, facilitan la formación de grafito. La forma, cantidad, tamaño y distribución de las láminas de grafito



deben ser controladas cuando se requiere obtener una fundición específica. Por otra parte un enfriamiento rápido y la presencia de agentes formadores y/o estabilizadores de carburos como el cromo y el molibdeno, dan lugar a la formación de diferentes carburos.¹¹

FÓSFORO

El fósforo favorece químicamente la formación del carburo, pero además, influye físicamente, porque la esteadita formada, que tiene un punto de fusión inferior a la austenita y al carburo, hace que la solidificación se realice en una zona mayor de temperaturas, y así aumenta el tiempo crítico disponible para que el silicio favorezca la grafitización. Si la proporción de fósforo es relativamente pequeña predomina el efecto físico y se estimula la grafitización.

Pequeñas cantidades de fósforo estabilizan el carburo, el fósforo admitido es de 0.15%.¹

La mayor parte del fósforo se combina con el hierro para formar fosfuro de hierro (Fe_3P), el cual constituye un eutéctico ternario con la cementita y la austenita.

El fósforo incrementa la fluidez y amplía el intervalo de solidificación eutéctico aumentando así la grafitización primaria cuando el contenido de silicio es alto y el del fósforo bajo; por ende es útil en piezas fundidas muy delgadas en las que un hierro menos fluido puede tomar una impresión perfecta del molde.²

El fósforo aumenta la fluidez, disminuye también la resistencia mecánica.⁴

CROMO

El cromo incrementa el carbono combinado, formando carburos complejos de hierro-cromo más estables que el carburo de hierro. Pequeñas cantidades de cromo incrementan la resistencia, la dureza, la profundidad de la capa de hierro blanco y la resistencia al desgaste y al calor, pero disminuyen la maquinabilidad.²

Las adiciones de cromo de menos del 1% dan una mejora general en las propiedades mecánicas.²



COBRE

El cobre es un grafitizador, pero sólo es una quinta parte más eficaz que el silicio a este respecto, el cobre tiende a romper la cementita maciza y a hacer resistente la matriz.²

MOLIBDENO

El molibdeno mejora las propiedades mecánicas y es un leve estabilizador de carcarburos, el molibdeno se añade en cantidades de 0.25 al 1.25 %, el molibdeno también retarda la transformación de la austerita, incrementando así la templabilidad y la libertad de la presencia de fisuras y deformación.²

VANADIO

El vanadio es un formador de carburo muy potente, estabiliza la cementita y reduce la grafitización. Las adiciones de vanadio, entre 0.1 y 0.25%, incrementa la resistencia tensil, la resistencia transversa y la dureza.²

NIQUEL

El níquel es un grafitizador, pero solo como la mitad de efectivo que el silicio. El propósito de Níquel (0.5 a 6.0%) es controlar la estructura retardando la transformación de austerita, estabilizando la perlita y manteniendo el carbono combinado en la cantidad eutectoide.²



2.3 PROCESOS DE FABRICACIÓN DEL HIERRO NODULAR ¹²

Se ha clasificado en grupos los procesos de nodularización para la fabricación del Hierro Nodular

Grupo 1

Esta formado por los procesos que emplean la olla como lugar de tratamiento para la nodularización.

OLLA ABIERTA

- a. – Simple
- b. – Nodularizante depositado en un desnivel de la olla, recubierto con rebaba de acero “Sándwich”
- c. – Nodularizante recubierto con carburo de calcio depositado en un desnivel de la olla, recubierto con rebaba de acero “Tigger”
- d.- Tapón poroso

OLLA CON CUBIERTA REMOVIBLE

- a.- Olla donde el metal se vierte por el extremo opuesto al que se le deposita el nodularizante “Olla con tundish”
- b.- Campana de inmersión
- c. – Olla cubierta y como nodularizante magnesio puro en lingote recubierto con refractario de 2 a 3 mm de espesor colocado en una campana que se sumerge “Pot a mousson o MAP”

OLLA CON CUBIERTA FIJA

- a.- Cámara de tratamiento similar a la del método tundish, su cubierta se fija por medio de pernos y se pone refractario moldeable entre la unión que sirve como sello.
- B.-Tetera



Grupo 2

Este engloba los procesos en los que la nodularización se realiza en el chorro de vaciado del horno, también llamados continuos o semicontinuos.

NODULARIZANTE EN ESTADO SOLIDO

a.- Canal horizontal revestido con refractario dentro de la cámara de reacción “Flow-trough”

b.-Canal horizontal revestido con refractario dentro de la cámara de reacción pero con una velocidad controlada que esta relacionada con el área de contacto del nodularizante “Flo-tret”

c.- Alambre

NODULARIZANTE A GRANEL

a. – Adición del nodularizante en el chorro de vaciado entre el horno y la olla de colada “T-Nock”

Grupo 3

Proceso que se realiza dentro del molde “In-Mold”

Sistema de nodularizante en el molde subdividido en:

IN MOLD

a.- Nodularizante Granular

b.- Nodularizante solido

c.- Nodularizante Sinterizado

Grupo 4

Proceso que se emplean convertidores semicontinuos.

Procesos que usan convertidor.

CONVERTIDOR

a.- Convertidor Fisher

b.- Convertidor Foseco



Grupo 5

Proceso en los cuales el sistema es presurizado.

Sistema presurizado. Estos procesos utilizan Mg metálico:

SISTEMAS A PRESION

- a.- Cámara Presurizada
- b.- Inyección con Lanza



2.4 EFECTO DE INOCULANTE

Siguiendo el tratamiento con magnesio, el hierro es sujeto a una inoculación final, a veces llamada post-inoculación. Es comúnmente llevada a cabo en una olla de tratamiento usando un inoculante granular, el cual puede ser ferrosilicio comercial conteniendo 75% de silicio o un rango de las mismas aleaciones conteniendo 60 a 80% de silicio. La cantidad de inoculante agregado variará desde 0.25% a 1%. Un alto % de silicio en la adición de magnesio puede dar una menor inoculación, el inoculante puede ser agregado durante el vaciado, agitado en el metal, depositado en la parte inferior de la olla de tratamiento antes del llenado o sumergido en una campana refractaria antes de la colada. Es necesario una segunda agitación efectiva, y una forma de conseguir esto es por burbujeo de aire o nitrógeno a través del metal fundido usando una toma porosa en la parte inferior de la olla de tratamiento. La inoculación reduce el subenfriamiento durante la solidificación y ayuda a evitar la presencia de carburos en la estructura, especialmente en secciones delgadas. Esto aumenta el número de nódulos de grafito, mejorando así la homogeneidad, asistiendo en la formación de ferrita y promoviendo la ductilidad.

El efecto de un inoculante es mayor cuanto antes se disuelva, después de lo cual éste se va desvaneciendo en un período de 20 a 30 minutos. La adición tardía de un inoculante a medida que el metal se comienza a colar es mucho más efectiva y puede ser logrado por la colocación de inoculante granular o cortada en partículas inoculantes en el molde en una extensión del mismo o en una cámara especial del sistema. Alternativamente el inoculante granular fino puede agregarse al flujo de metal vaciado de la olla de tratamiento hacia el molde o agregarse en el corredor del sistema de colada del molde.

La última inoculación es a veces practicada junto con otros métodos de inoculación como una manera de intensificar el efecto de la inoculación.⁹



2.5 NODULARIZACIÓN

Tiene por objeto favorecer la precipitación de los nódulos de grafito, alrededor de las partículas de ferro silicio.¹³

Nucleación

La nucleación y la grafitización son aceleradas por la presencia de partículas submicroscópicas que pueden introducirse en el hierro mediante el adecuado proceso de fusión. Los contenidos de silicio y carbono promueven la nucleación y la grafitización.²

A continuación se muestra la tabla número uno en donde se proporciona la información de la composición química de dos de los nodularizantes con los que se trabajo en este trabajo experimental.

Tabla No. 1. Composición química de los nodularizantes.

NODULOY R5		NODULOY R6		NODULOY R9	
Elemento	Porcentaje (%)	Elemento	Porcentaje (%)	Elemento	Porcentaje (%)
Si	46.61	Si	45.43	Si	44.70
Mg	5.30	Mg	6.42	Mg	8.56
Al	0.77	Al	0.62	Al	0.67
Ca	0.83	Ca	1.12	Ca	1.27
TRE	0.96	TRE	1.09	Ce	0.47



2.6 TIPOS DE HIERRO NODULAR ¹³

En lo que respecta a la composición química, los hierros nodulares son similares al hierro gris, aunque con adiciones especiales de magnesio y cerio para provocar la precipitación del carbono en forma nodular y dependiendo de la estructura cristalina existen los siguientes tipos:

- Hierro Nodular Ferrítico
- Hierro Nodular Perlítico
- Hierro Nodular Perlítico-Ferrítico
- Hierro Nodular Martensítico
- Hierro Nodular Austenítico
- Hierro Nodular Austemperizado

Hierro Nodular Ferrítico

Es una aleación en donde las esferas de grafito se encuentran incrustadas en una matriz de ferrita; se le llama ferrita a una estructura básicamente compuesta por hierro, las propiedades más importantes de esta aleación son:

- Alta resistencia al impacto
- Moderada conductividad térmica
- Alta permeabilidad magnética
- En algunas ocasiones, buena resistencia a la corrosión
- Buena maquinabilidad

Hierro Nodular Perlítico

En esta aleación las esferas de grafito se encuentran dentro de una matriz de perlita; se denomina perlita a la microestructura formada por capas o laminas alternadas de las dos fases [ferrita y cementita (carburo de hierro Fe_3C)], sus propiedades son:



- Relativamente duro
- Alta resistencia
- Buena resistencia al desgaste
- Moderada resistencia al impacto
- Poca conductividad térmica
- Baja permeabilidad magnética
- Buena maquinabilidad

Hierro Nodular Perlítico-Ferrítico

En esta aleación, las esferas de grafito están mezcladas en una matriz de ferrita y perlita. Esta es la más común de las aleaciones de Hierro Nodular y sus propiedades se encuentran entre las propiedades de una estructura de Hierro Nodular Ferrítico y Hierro Nodular Perlítico, tienen además:

- Buena maquinabilidad

Hierro Nodular Martensítico

Como producto de fundición, el Hierro Nodular Martensítico es una aleación dura y frágil, por lo tanto, raramente utilizada. Sin embargo, después de un tratamiento térmico de templado (Martensita Templada), la aleación tiene una alta resistencia tanto mecánica como a la corrosión, además de una alta dureza la cual puede tener un rango de 250 HB (Dureza Brinell) a 300 HB.

Hierro Nodular Austenítico

Estos tipos de aleaciones son ampliamente utilizados por su buena resistencia mecánica, así como por su resistencia tanto a la corrosión como a la oxidación, poseen además, propiedades magnéticas y una alta estabilidad de la resistencia mecánica y dimensionales a elevadas temperaturas.

**2.7 CARACTERISTICAS DE LOS HIERROS NODULARES.**^{8,13,14}

La clasificación de las fundiciones nodulares se realiza de acuerdo a la ASTM A-536 tomando en cuenta su resistencia y se designa una nomenclatura de tres números los cuales tienen en cuenta las resistencia en psi y el alargamiento siendo usuales fundiciones del tipo 60-40-18 con resistencia de 40 KPSI y alargamiento del 18 % o la 120-70-02 con una resistencia de 70 KPSI y un alargamiento promedio de 2 %, evidentemente a mayor resistencia mecánica menor capacidad de alargamiento.

En la tabla número dos se proporciona la información de las propiedades mecánicas de los diferentes grados de hierro nodular de acuerdo a la norma ASTM A-536

Tabla No.2. Relación de propiedades mecánicas de acuerdo a la ASTM A-536.

Clase	Resistencia psi X 1000	Lim. Fluencia	Dureza brinell	Alargamiento (%)
60-40-18	42000	28000	149-187	18
65-45-12	45000	32000	170-207	12
80-55-06	56000	38000	187-255	6
100-70-03	70000	47000	217-267	3
120-70-02	84000	63000	240-300	2



A continuación se muestra la tabla número tres en donde se proporciona la información de las características de los diferentes grados de hierro nodular de acuerdo a la norma ASTM A-536.

Tabla No.3. Características de los diferentes grados de hierro nodular.

Norma	Grado	Descripción	Uso general
ASTM A536	60-40-18	Ferrita; puede ser recocida	Piezas resistentes al impacto, servicio a baja temperaturas
	65-45-12	Mayoritariamente ferrítica; de colada o recocida	Servicios generales
	80-55-06	Ferrítica-Perlítica, puede ser normalizada	Servicios generales
	100-70-03	Mayoritariamente perlítica; puede ser normalizada.	La mejor combinación de resistencia al desgaste y tenacidad. Buena respuesta al endurecimiento superficial
	120-70-02	Martensítica; temple al aceite y revenido	La mas tenaz y resistente al desgaste

En la tabla número cuatro se proporciona la información de la composición química de los diferentes grados de hierro nodular.

Tabla No.4. Composición química de los diferentes tipos de grados de hierro nodular

Composición Química (%)	Grado 60-40-18	Grado 65-45-12	Grado 80-55-06	Grado 100-70-03	Grado 120-90-02
C	3.5-3.9	3.5-3.9	3.5-3.9	3.5-3.8	3.5-3.8
Si	2.2-3.0	2.5-2.8	2.2-2.7	2.2-2.7	2.2-2.7
Mn	0.3 máx.	0.4 máx.	0.2-0.5	0.6 max	0.6 max
P	0.05 max	0.05 max	0.05 max	0.05 max	0.05 max
S	0.015 max	0.015 ax	0.015 max	0.015 max	0.015 max
Cr	0.06 max	0.1 máx.	0.1 máx.	0.1 máx.	0.1 máx.
Ni	-	-	-	-	-
Cu	-	-	0.2-0.4	0.2-0.50	0.2-0.50



A continuación se muestra la tabla número cinco en donde se proporciona la información de las propiedades de los diferentes grados de hierro nodular en función de su matriz y un tratamiento térmico.

Tabla No.5. Propiedades mecánicas de los diferentes tipos de grados de hierro nodular en función de su matriz y un tratamiento térmico.

	Ferrítico	Ferrítico-Perlítico	Perlítico	Martensítico (Con Austenita Retenida)	Martensita Templada	Austemperizado	Austemperizado	Austenítico
Grado ASTM	60-40-18	80-55-06	100-70-03	DQ&T	-	1050-700-7	1600-1300	-
Dureza (HB)	143-187	-	-	-	-	302-363	444-555	-
Esfuerzo de cedencia (MPa)	276	379	483	-	-	700	1300	-
Deformación (%)	18	6	3	-	-	7	-	-
Resistencia a la Tensión (MPa)	414	552	690	600	793	1050	1600	310



3.1 DISEÑO EXPERIMENTAL

A continuación se describe el procedimiento experimental empleado en este trabajo el cual se dividió en 4 etapas. Previamente se realizó un proceso de mantenimiento e implementación de materiales; como herramientas así como el diseño experimental donde se implementó y corroboró factores que influyeran en el convertidor.

La primera etapa fue la fusión del hierro nodular grado 100 para la fabricación de piezas en forma de placas Figura No 1, utilizando un nodularizante denominado Noduloy R6, Tabla No 1.

La segunda etapa fue la fusión del hierro nodular grado 100 para la fabricación de piezas en forma de placas Figura No 1, utilizando un nodularizante denominado Noduloy R9, Tabla No 1.

(La etapa uno y dos se efectuaron por el método de convertidor de cámara falsa implementando el método de nodularización y la inoculación en el proceso.)

La tercera etapa fue la de corte, desbaste y preparación metalográfica para la caracterización de las piezas.

La cuarta etapa fue la evaluación metalográfica de las piezas.



En la tabla número seis se proporciona los datos de las dimensiones de las piezas fabricadas en el diseño de la placa modelo.

Tabla No.6. Dimensiones de las piezas de hierro nodular en forma de placa.

Pieza	Ancho (cm.)	Espesor (cm.)	Largo (cm.)
A	5.9	0.5	7.9
B	6.1	1	8.1
C	7.7	1.9	6.0
D	7.3	3.9	5.9

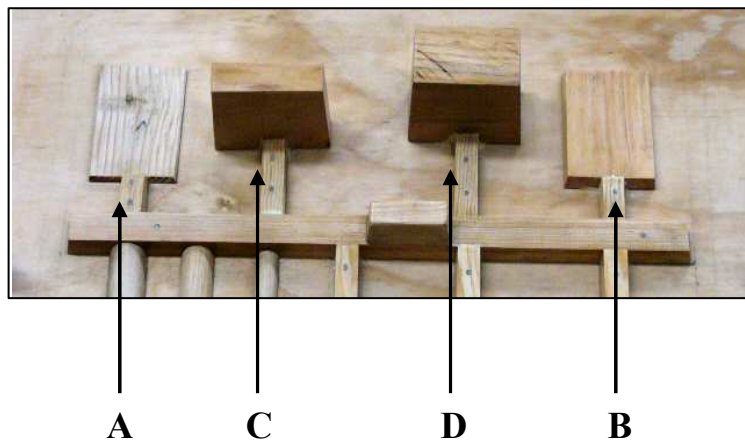
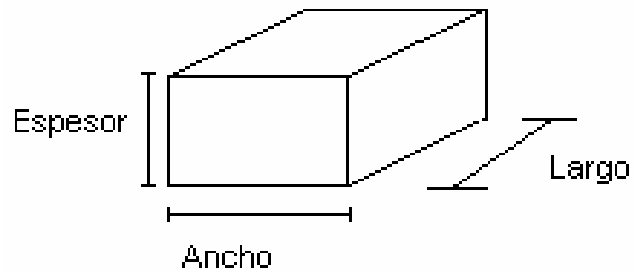


Figura No. 1. Piezas del diseño de la placa modelo.



3.2 Equipo y Material

EQUIPO Y HERRAMENTAL	MATERIAL
-Adquisidor de lecturas de temperatura (SPEEDOMAX 2500 RECORDER)	-Alúmina en polvo 1 y 0.3 (micras)
- Espectrómetro de emisión de masas.	-Termopar tipo "S"
- Pisoneta neumática.	-Chatarra de Acero como materia prima (composición química conocida)
-Banco (accesorio para la muestra de composición química)	-Chatarra de hierro como materia prima (composición química conocida)
-Cajas para moldeo en verde (adobera)	-Discos de hierro nodular (cercaos a la composición química con tornillo para maniobrar)
-Convertidor de doble cámara	-Ferro aleaciones (Fe-Mn73%, Fe-Si75%, Recarburante, Inoculante, Descorificador)
-Cronómetro	-Nital 3 (Como Reactivo Químico)
-Cuchara fabricada para la inoculación.	-Nodularizante Noduloy R6
-Cuchara para muestreo de análisis químico.	-Nodularizante Noduloy R9
-Equipo de desbaste paño grueso y fino	-Pintura de zircón
-Horno de inducción (75 Kw.)	-Suspensión de diamante 0.3 micras
-Molino Tipo Chileno (Cáp. 80 kg.)	-Tapas de fibra de vidrio. (En presentación de lana)
-Microscópio (Aumento 100 X)	-Tapones de fibra de vidrio (En presentación de lana)
-Pinzas largas (para transportar los tapones de fibra de vidrio)	
-Placa modelo	
-Grúa (polipasto)	
-Quemador de gas	



3.3 PROCESO DE MANTENIMIENTO E IMPLEMENTACION DE MATERIALES

3.3.1 Placa modelo

Se realizó una placa modelo la cual consta de cuatro impresiones, las impresiones tiene diferentes dimensión las cuales se encuentran en la tabla No. 6, así como las dimensiones en del sistema de colada en la tabla No.7, a cada pieza se le realizó su ángulo de salida de 3° para poder tener un desmoldado adecuado.

A continuación se muestra la tabla número siete en donde se proporciona la información del sistema de colada.

Tabla No.7 Dimensiones del sistema de colada.

	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Espesor (cm)	Ancho (cm)
Bajada del sistema de alimentación	12	2.3	-	-
Corredor de la placa modelo	-	-	1.6	2.2
Entrada de la alimentación	-	-	1.1	1.7

3.3.2 Fabricación de moldes de arena en verde

Se realizó primeramente la preparación de una arena nueva preparada tabla No.8, con la arena nueva se realizó las pruebas de moldeo de la placa modelo variando la humedad de 3.3% - 3.8% llegando a la óptima para este experimento de 3.5%. Con esta humedad no se presentó desmoronamiento ni arrastre de arena en el moldeo de la placa modelo, el sistema de bajada fue de un diámetro de 2.3 cm donde su tina de colada fue de 8 cm X 2.5 cm.



En la tabla número ocho se proporciona los datos de las características de la arena preparada de moldeo en verde.

Tabla No.8 Características de la arena de moldeo en verde.

Arena Nueva			
40-50 AFS			
Preparación de 80 kg.			
Aditivos		Humedad (%)	Tiempo de Mezclado (min)
Bentonita Sodica	4 %	3.5 Agua potable	6
Bentonita Calcica	6 %		
Harina de maíz (mogul)	1 %		
Harina de madera	1 %		

3.3.3 Materia prima chatarra de hierro y acero.

Se realizaron fusiones anteriores de hierro para clasificar las chatarras y de ahí partir con sistema de carga controlado de acuerdo a su composición química.

Con las chatarras clasificadas se realizó una fusión para la fabricación de discos cercanos a la composición química del hierro grado 100-70-03 así como la fabricación de una cuchara de mango largo para realizar la inoculación donde transporta aproximadamente 65 gramos de inoculante Fe-Si 75% con una granulometría de malla 80, estas fusiones previas nos sirvieron para establecer parámetros en la temperatura de vaciado, tratamiento y colada.

Con estas fusiones previas se implementó el desarrollo de limpieza adecuado para la chatarra de acero como la de hierro con la finalidad de desengrasar la chatarra de acero para que no provocara un exceso de azufre en el metal y en la de hierro



una limpieza con cepillo eliminando la arena para evitar la contaminación en el metal al momento de descorificar.

3.3.4 Equipo para el muestreo de metal para análisis químico.

Durante cada experimento se limpiaron las paredes del porta muestra de metal para evitar que la muestra saliera con defectos de rugosidad. Se repararon las cucharas de mango largo, cambiándoles la lana y recubriéndolas con pintura de zircón.

3.3.5 Elaboración de tapones de fibra de vidrio.

Se fabricaron tapones de fibra de vidrio del diámetro que se tiene entre la conexión de las dos cámaras del convertidor, dichos tapones se realizaron de 5cm de diámetro con 7cm de altura estos tapones se endurecieron con silicato CO_2

3.3.6 Varillas para limpieza de escoria.

Se recortaron varillas para la descorificación en el horno así como en el convertidor aproximadamente de 70 cm.

3.3.7 Mantenimiento e implementación en el convertidor.

Se le dio mantenimiento al convertidor en la cuestión de cambio de refractario en las zonas críticas, así como el recubrimiento con la pintura de zircón, limpieza en las cuerdas del sistema de sujeción de las tapas.

Se realizó un escalón en la parte superior de la cámara de tratamiento de metal líquido para que con este apoyo se sostuviera el disco de hierro nodular cercano a la composición química, ya que la finalidad de este disco es sostener la cantidad



de nodularizante impidiendo que reaccione antes del tratamiento de nodularización.

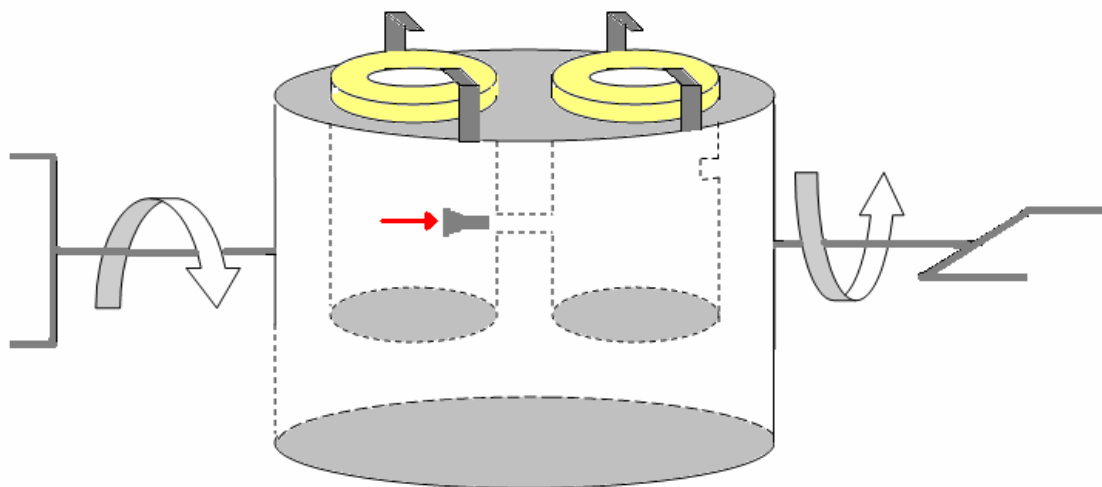


Figura No. 2. Convertidor que se utilizo para la fabricación del hierro nodular grado 100-70-03

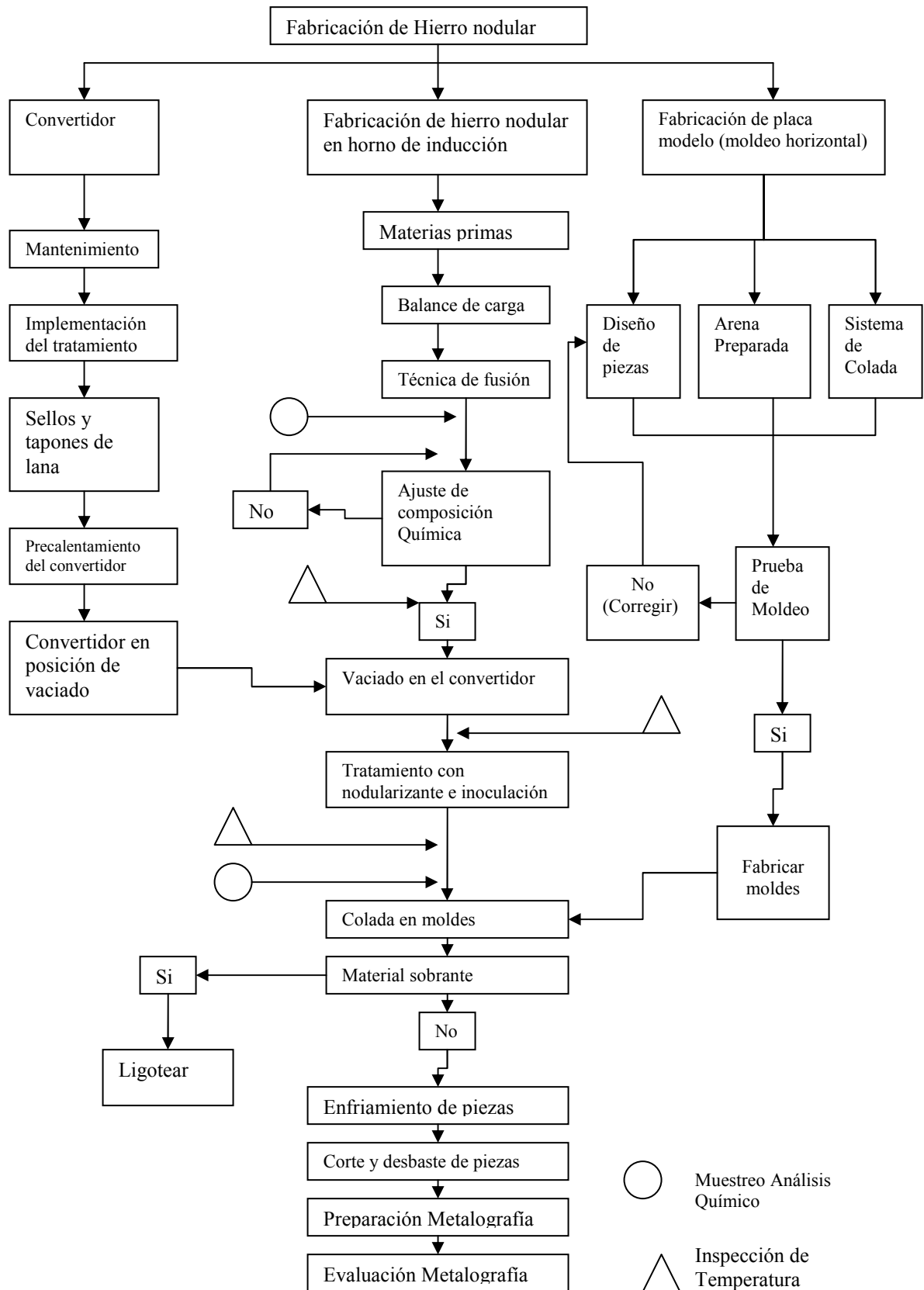


Figura No. 3. Diagrama del proceso



3.4 Etapa 1

Fabricación de Hierro Nodular Grado 100-70-03

Nodularizante Noduloy R6

Parámetros:

Nodularizante Noduloy R6 (6.42% Mg)	
Balance de carga 72 kilogramos	
Magnesio Residual 0.05 %	
Eficiencia 45 %	
Inoculante 0.15 %	
0.125% Inoculante 0.025% Post Inoculante	
Rangos de temperatura	
Vaciado	1550°C - 1500°C
Tratamiento	1370°C - 1350°C
Colada	1350°C - 1300°C
Tiempo de tratamiento 45 seg.	

Técnica de fusión y tratamiento en el convertidor:

- Obtenidas las condiciones y el equipo para realizar las pruebas experimentales se procedió con el proceso de fusión del hierro.
- Se fabricaron cuatro moldes de arena de moldeo en verde; un blanco y tres del diseño de la placa modelo.
- Obtenida la composición química de fusiones previas, se realizó el balance de carga para tener las proporciones definidas de chatarra de hierro así como la chatarra de acero para suministrarlas en el horno de inducción.
- Se realizó la fusión de las chatarras de hierro y acero en el horno de inducción, al mismo tiempo se realizó el precalentamiento de las cámaras



del convertidor ayudados de un quemador de gas con dos salidas ajustadas a la altura de las cámaras del convertidor.

- Cuando el metal estaba completamente fundido se realizó el muestreo de composición química a través de la obtención de una muestra de metal que fue analizada en el espectrómetro de emisión.
- Con la información del espectrómetro de emisión se realizaron los ajustes de la composición química para el metal líquido con ferroaleaciones y ajustada la composición requerida se empezó a controlar la temperatura del horno para empezar a vaciar hacia el convertidor.
- Habiendo llegado a la temperatura requerida se procedió a preparar el convertidor que se estaba precalentando; colocando un tapón de fibra de vidrio en la comunicación de las dos cámaras del lado de la cámara donde no se realiza el tratamiento, la finalidad del tapón de lana es impedir de que en la reacción de tratamiento del metal líquido con el nodularizante entre lo menos posible en contacto con el oxígeno presente en la cámara de tratamiento.
- Con la temperatura controlada en el horno se realizó el primer vaciado del horno a la cámara de tratamiento del convertidor, esta misma se llenó de metal hasta el tope con la finalidad de calentar homogéneamente la cámara, y este material fue vaciado en una lingotera.
- Estando el convertidor caliente, el rango de temperaturas ajustadas y la composición química en el nivel requerido se vació el metal líquido en el convertidor hasta la indicación de 18 kilogramos aproximados en la cámara de tratamiento.
- Con el metal en la cámara del convertidor se realizó los ajustes para el tratamiento con el nodularizante Noduloy R6, donde se colocó en el escalón de la cámara un disco de hierro nodular el cual sostendría la cantidad de nodularizante ya calculado.
- El convertidor con su cámara de tratamiento bien cerrada con su respectiva tapa se levantó con la ayuda de la grúa (polipasto) y se realizó un giro de 140° aproximadamente para que el disco se fundiera al entrar en contacto con el metal líquido y empezara a realizarse el tratamiento de nodularización durante 45 segundos.
- Después del tratamiento el convertidor se colocó en posición horizontal y se quitó de la cámara donde no se realizó el tratamiento el tapón de lana y se agregó el inoculante.



- Se vació el metal en los moldes de arena fabricados, donde en la tina de colada se colocó su post inoculación, para cada colada se tomo una muestra de metal para análisis químico.



BALANCE DE CARGA DE 72 KILOGRAMOS
CON EL NODULARIZANTE
NODULOY R6

1.-Magnesio en kilogramos.

$$72\text{kg Mg} \left(\frac{0.05\%}{100\%} \right) = 0.036\text{kg Mg} \approx 36\text{g Mg}$$

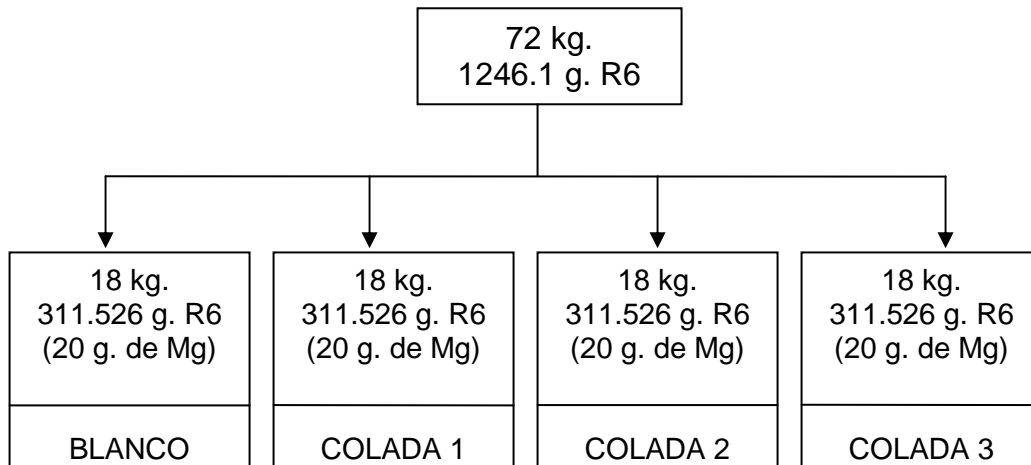
2.-Eficiencia del magnesio (45% Ef.).

$$36\text{g Mg} \left(\frac{100\%}{45\%} \right) = 80\text{g Mg}$$

3.-Nodularizante Noduloy R6 (6.42 % Mg).

$$80\text{g Mg} \left(\frac{100\%}{6.42\%} \right) = 1246.1\text{g Mg} \approx 1.246\text{kg R6}$$

La cantidad calculada de nodularizante Noduloy R6 para cada molde en donde el peso de la colada fue de 18 kilogramos.





4.-Aportación de silicio contenido en el nodularizante Noduloy R6.

Composición química del silicio en el Noduloy R6 (45.43% Si)

$$1.2461 \text{ kg} \left(\frac{45.43\%}{100\%} \right) = 0.566 \text{ kg Si}$$

$$100\% \left(\frac{0.566 \text{ kg}}{72 \text{ kg}} \right) = 0.78\% \text{ Si}$$

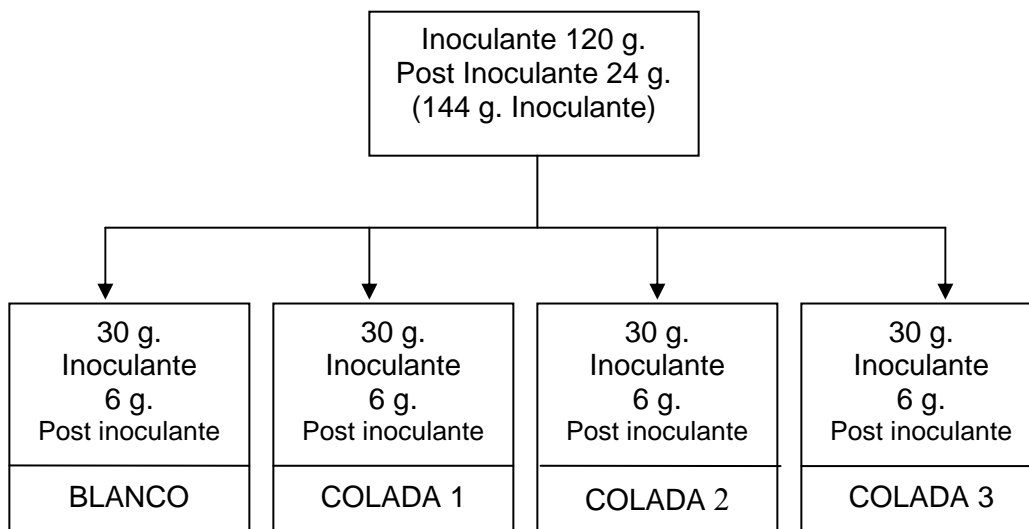
5.-Inoculante.

$$72 \text{ kg} \left(\frac{0.15\%}{100\%} \right) = 0.108 \text{ kg}$$

$$0.108 \text{ kg} \left(\frac{100\%}{75\%} \right) = 0.144 \text{ kg} \approx 144 \text{ g Inoculante}$$

$$0.15\% \left\{ \begin{array}{l} 0.125\% \text{ Inoculante} \longrightarrow 120 \text{ g. Para cada molde} \\ 0.025\% \text{ Post inoculante} \longrightarrow 24 \text{ g. Para cada molde} \end{array} \right.$$

La cantidad de Inoculante y post Inoculante calculada para cada molde en donde el peso de la colada fue de 18 kilogramos.





6.-Análisis teórico del silicio requerido para obtener la composición química del grado 100-70-03.

$$2.45 \% (\text{Grado 100}) - [0.78\% (\text{Noduloy R6}) + 0.15\% (\text{Inoculante})] = 1.52 \% \text{ Si}$$

$$72 \text{ kg} \left(\frac{1.52 \%}{100 \%} \right) = 1.09 \text{ kg Si}$$

7.- Cantidad de chatarra a suministrar respecto al silicio.

$$72 \text{ kg.} = \text{Ch A} + \text{Ch B} + \text{Ch C}$$

$$\text{Si requerido} = 1.09 \text{ kg.}$$

$$1.09 \text{ kg.} = \text{Ch A} + \text{Ch B} + \text{Ch C}$$

A continuación se muestra la tabla número nueve en donde se proporciona la información de la composición química de las chatarras de hierro y acero que se utilizaron en este trabajo experimental.

Tabla No. 9. Composición química de las chatarras de hierro y acero que se utilizaron en la fusión del hierro nodular grado 100-70-03 con el nodularizante Noduloy R6.

Composición Química (%)	Grado 100-70-03 (%)	Promedio	Ch A Hierro (%)	Ch B Hierro (%)	Ch C Acero (%)
C	3.5-3.8	3.7	4.32	3.233	0.0403
Si	2.2-2.7	2.45	2.489	2.363	0.0143
Mn	0.6 max		0.559	0.2416	0.2126
P	0.05 max				
S	0.015 max		0.039	0.0042	0.0078
Cr	0.1 max				
Ni	-				
Cu	0.2-0.50				



Se agregan 35 kg. de Ch A.

$$35 \text{ kg} \left(\frac{2.489 \%}{100 \%} \right) = 0.8711 \text{ kg} \quad Si$$

$$1.09 \text{ kg.} = 0.8711 \text{ kg.} + \text{Ch B} + \text{Ch C}$$

$$\text{Ch B} + \text{Ch C} = 37 \text{ kg.}$$

$$\text{Ch B} = 37 \text{ kg} - \text{Ch C}$$

$$1.09 \text{ kg.} = 0.8711 \text{ kg} + (37 \text{ kg} - \text{Ch C}) \left(\frac{2.363\%}{100\%} \right) + \text{Ch C} \left(\frac{0.0143\%}{100\%} \right)$$

$$1.09 \text{ kg.} = 0.8711 \text{ kg} + (0.8743 \text{ kg} - \text{Ch C} 0.02363) + \text{Ch C} (1.43\text{E-}4)$$

$$1.09 \text{ kg} - (0.8711 \text{ kg} + 0.8743 \text{ kg}) = (1.43\text{E-}4 \text{ kg} - 0.02363) \text{Ch C}$$

$$-0.6554 \text{ kg} = -0.023487 \text{Ch C}$$

$$\text{Ch C} = \left(\frac{-0.6554 \text{ kg}}{-0.023487} \right)$$

$$\text{Ch C} = 27.90 \text{ kg}$$

$$\text{Ch B} = 37 \text{ kg} - \text{Ch C}$$

$$\text{Ch B} = 37 \text{ kg} - 27.90 \text{ kg}$$

$$\text{Ch B} = 9.09 \text{ kg}$$

Cantidad de kilogramos suministrados de cada chatarra para la fusión.

$$72 \text{ kg} \left\{ \begin{array}{l} \text{Ch A} = 35 \text{ kg} \\ \text{Ch B} = 9 \text{ kg} \\ \text{Ch C} = 28 \text{ kg} \end{array} \right\}$$

AJUSTE DE ELEMENTOS DE ACUERDO AL BALANCE DE CARGA

1) Carbono

$$C_{Kg A} \quad 35 \text{ kg} \left(\frac{4.32\%}{100\%} \right) = 1.512 \text{ kg}$$

$$C_{Kg B} \quad 9 \text{ kg} \left(\frac{3.233\%}{100\%} \right) = 0.29 \text{ kg}$$

$$C_{Kg C} \quad 28 \text{ kg} \left(\frac{0.0403\%}{100\%} \right) = 0.01128 \text{ kg}$$

$$C_T = 1.8132 \text{ kg.}$$

$$C_{\text{requerido}} = 3.7\%$$

$$72 \text{ kg} \left(\frac{3.7\%}{100\%} \right) = 2.664 \text{ kg}$$

$$2.664 \text{ kg} \left(\frac{100\%}{99\%} \right) = 2.69 \text{ kg}$$

Para compensar la pérdida de carbono durante la fusión se agrega el 0.3% de carbono.

$$72 \text{ kg} \left(\frac{0.3\%}{100\%} \right) = 0.216 \text{ kg}$$

$$2.69 \text{ kg.} + 0.216 \text{ kg.} = 2.906 \text{ kg}$$

$$2.906 \text{ kg} - 1.8132 \text{ kg} = 1.0298 \text{ kg de recarburante}$$

2) Manganeso

$$Mn_{Kg A} \quad 35 \text{ kg} \left(\frac{0.559\%}{100\%} \right) = 0.1956 \text{ kg}$$



$$Mn_{Kg B} = 9 \text{ kg} \left(\frac{0.2416\%}{100\%} \right) = 0.021744 \text{ kg}$$

$$Mn_{Kg C} = 28 \text{ kg} \left(\frac{0.2126\%}{100\%} \right) = 0.059528 \text{ kg}$$

$$Mn_T = 0.2768 \text{ kg.}$$

$$Mn_{requerido} = 0.6 \%$$

$$72 \text{ kg} \left(\frac{0.6 \%}{100\%} \right) = 0.432 \text{ kg}$$

$$0.432 \text{ kg.} - 0.2768 \text{ kg.} = 0.1552 \text{ kg}$$

$$0.1552 \text{ kg} \left(\frac{100 \%}{73\%} \right) = 0.2126 \text{ kg} \approx 212.6 \text{ g Fe - Mn} 73\%$$

En la tabla número diez se muestra la información de las materias primas que se suministraron en el experimento con el nodularizante Noduloy R6.

Tabla No. 10. Relación de los materiales que se utilizaron durante la fusión del hierro nodular con el nodularizante Noduloy R6.

Materia Prima	Cantidad adicionada (kg)	%	C (kg)	Si (kg)	Mn (kg)
Ch A	35	46.896	1.512	0.871	0.1956
Ch B	9	12.059	0.29	0.213	0.0217
Ch C	28	37.517	0.01128	0.004	0.0595
Noduloy R6	1.246	1.6695	0	0.566	0
Recarburante	1.0298	1.3798	1.029	0	0
Inoculante Fe-75% Si	0.144	0.1929	0	0.144	0
Ferro silicio Fe-75% si	0	0	0	0	0
Ferromanganeso Fe - 73% Mn	0.2126	0.2848	0	0	0.2126
Real	74.632	100	2.84	1.798	0.4894
Teórico			2.66	1.764	0.432



A continuacion se presenta la tabla número 11 donde muestra el análisis químico preliminar de la colada.

Tabla No. 11 Composición química preliminar de la colada con el nodularizante Noduloy R6.

Composición Química										
Elemento	C	Si	Mn	P	S	Ni	Al	Cu	Mg	Fe
%	4.007	1.34	0.3463	0.0213	0.0170	0.06	5E-4	0.10	5E-3	93.9

Ajuste de silicio durante la fusión

Silicio requerido 1.52% y se obtuvo en el preliminar de 1.345%

$$1.52\% - 1.345\% = 0.175\%$$

$$72 \text{ kg} \left(\frac{0.175\%}{100\%} \right) = 0.126 \text{ kg Si}$$

$$0.126 \text{ kg} \left(\frac{100\%}{75\%} \right) = 0.168 \text{ kg Si} \approx 168 \text{ gFe} - \text{Si } 75\%$$

Ajuste de manganeso durante la fusión

Manganeso requerido 0.6% y se obtuvo en el preliminar de 0.3463%

$$0.6\% - 0.3463\% = 0.2537\% \text{Mn}$$

$$72 \text{ kg} \left(\frac{0.2537\%}{100\%} \right) = 0.1826 \text{ kg Mn}$$

$$0.1826 \text{ kg} \left(\frac{100\%}{73\%} \right) = 0.2502 \text{ kg Mn} \approx 250 \text{ gFe} - \text{Mn } 73\%$$



3.4 Etapa 2

Fabricación de Hierro Nodular Grado 100-70-03

Nodularizante Noduloy R9

Parámetros:

Nodularizante Noduloy R9 (8.56% Mg)	
Balance de carga 57 kilogramos	
Magnesio Residual 0.05 %	
Eficiencia 45 %	
Inoculante 0.15 %	
0.125% Inoculante 0.025% Post Inoculante	
Rangos de temperatura	
Vaciado	1550°C - 1500°C
Tratamiento	1370°C - 1350°C
Colada	1350°C - 1300°C
Tiempo de tratamiento 45 seg.	

Técnica de fusión y tratamiento en el convertidor:

- Obtenidas las condiciones y el equipo para realizar las pruebas experimentales se procedió con el proceso de fusión del hierro.
- Se fabricaron tres moldes de arena de moldeo en verde; un blanco y dos del diseño de la placa modelo.
- Obtenida la composición química de fusiones previas, se realizó el balance de carga para tener las proporciones definidas de chatarra de hierro así como la chatarra de acero para suministrarlas en el horno de inducción.
- Se realizó la fusión de las chatarras de hierro y acero en el horno de inducción, al mismo tiempo se realizó el precalentamiento de las cámaras del convertidor ayudados de un quemador de gas con dos salidas ajustadas a la altura de las cámaras del convertidor.



- Cuando el metal estaba completamente fundido se realizó el muestreo de composición química a través de la obtención de una muestra de metal que fue analizada en el espectrómetro de emisión.
- Con la información del espectrómetro de emisión se realizaron los ajustes de la composición química para el metal líquido con ferroaleaciones y ajustada la composición requerida se empezó a controlar la temperatura del horno para empezar a vaciar hacia el convertidor.
- Habiendo llegado a la temperatura requerida se procedió a preparar el convertidor que se estaba precalentando; colocando un tapón de fibra de vidrio en la comunicación de las dos cámaras del lado de la cámara donde no se realiza el tratamiento, la finalidad del tapón de lana es impedir de que en la reacción de tratamiento del metal líquido con el nodularizante entre lo menos posible en contacto con el oxígeno presente en la cámara de tratamiento.
- Con la temperatura controlada en el horno se realizó el primer vaciado del horno a la cámara de tratamiento del convertidor, esta misma se llena de metal hasta el tope con la finalidad de calentar homogéneamente la cámara, y este material fue vaciado en una lingotera.
- Estando el convertidor caliente, el rango de temperaturas ajustadas y la composición química en el nivel requerido se vació el metal líquido en el convertidor hasta la indicación de 19 kilogramos aproximados.
- Con el metal en la cámara del convertidor se realizó los ajustes para el tratamiento con el nodularizante Noduloy R9, donde se colocó en el escalón de la cámara un disco de hierro nodular el cual sostendría la cantidad de nodularizante ya calculado.
- El convertidor con su cámara de tratamiento bien cerrada con su respectiva tapa se levantó con la ayuda de la grúa (polipasto) y se realizó un giro de 140° aproximadamente para que el disco se fundiera al entrar en contacto con el metal líquido y empezara a realizarse el tratamiento de nodularización durante 45 segundos.
- Después del tratamiento el convertidor se colocó en posición horizontal y se quitó de la cámara donde no se realizó el tratamiento el tapón de lana y se agregó el inoculante.
- Se vació el metal en los moldes de arena fabricados, donde en la tina de colada se colocó su post inoculación, para cada colada se tomó una muestra de metal para análisis químico.



BALANCE DE CARGA DE 57 KILOGRAMOS
CON EL NODULARIZANTE
NODULOY R9

1.-Magnesio en kilogramos

$$57\text{kg Mg} \left(\frac{0.05\%}{100\%} \right) = 0.0285 \text{ kg Mg} \approx 28.5 \text{ g Mg}$$

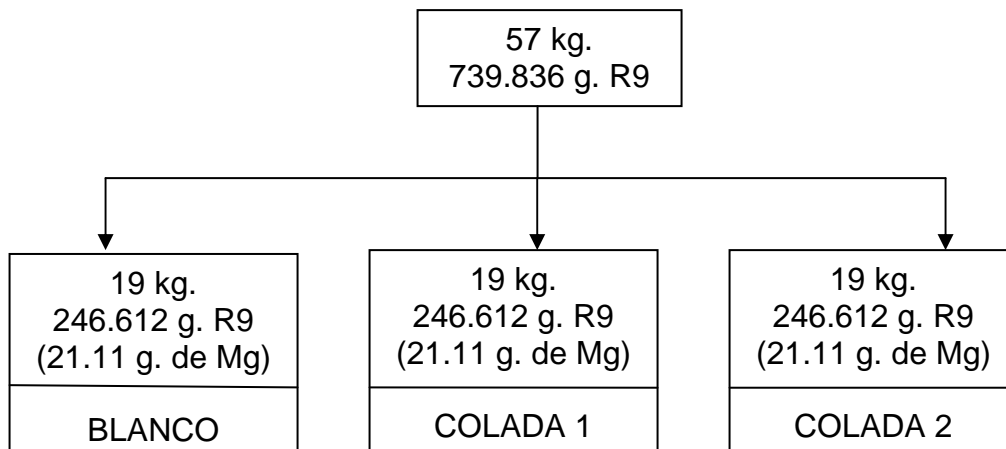
2.-Eficiencia del magnesio (45% Ef)

$$28.5\text{g Mg} \left(\frac{100\%}{45\%} \right) = 63.33 \text{ g Mg}$$

3.-Nodularizante Noduloy R9 (8.56 % Mg.)

$$63.33\text{g Mg} \left(\frac{100\%}{8.56\%} \right) = 739.836 \text{ g Mg} \approx 0.739 \text{ kg R9}$$

La cantidad calculada de nodularizante Noduloy R9 para cada molde en donde el peso de la colada fue de 19 kilogramos.





4.- Aportación de silicio contenido en el nodularizante Noduloy R9.

Composición química del silicio en el Noduloy R9 (44.7% Si)

$$0.739 \text{ kg} \left(\frac{44.7\%}{100\%} \right) = 0.33 \text{ kg Si}$$

$$100\% \left(\frac{0.33 \text{ kg}}{57 \text{ kg}} \right) = 0.5789\% \text{ Si}$$

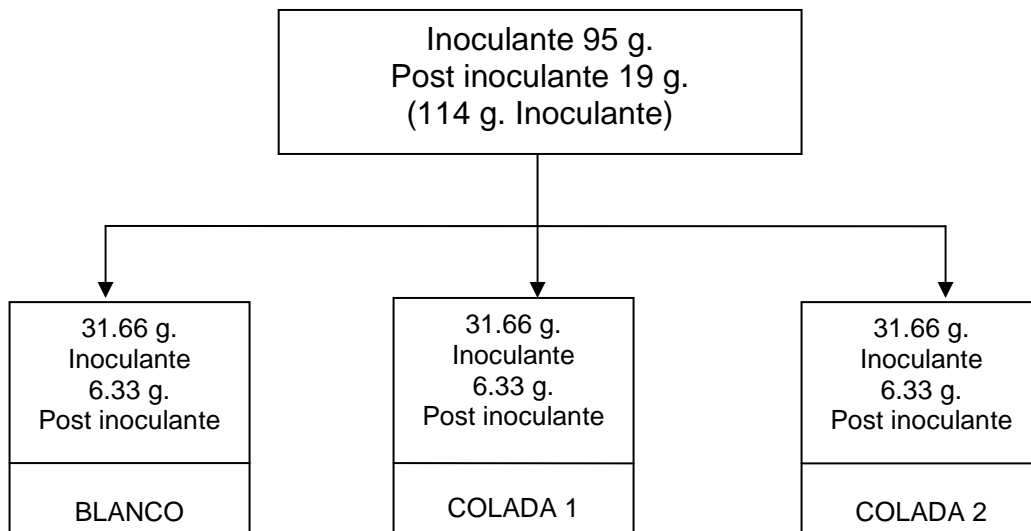
5.-Inoculante.

$$57 \text{ kg} \left(\frac{0.15\%}{100\%} \right) = 0.0855 \text{ kg}$$

$$0.0855 \text{ kg} \left(\frac{100\%}{75\%} \right) = 0.114 \text{ kg} \approx 114 \text{ g Inoculante}$$

$$0.15\% \begin{cases} 0.125\% \text{ Inoculante} & \longrightarrow 95 \text{ g. Para cada molde} \\ 0.025\% \text{ Post inoculante} & \longrightarrow 19 \text{ g. Para cada molde} \end{cases}$$

La cantidad de Inoculante y post Inoculante calculada para cada molde en donde el peso de la colada fue de 19 kilogramos.





6.-Análisis teórico de silicio requerido para obtener la composición química del grado 100-70-03.

$$2.45 \% (\text{Grado 100}) - [0.5789\% (\text{Noduloy R9}) + 0.15\% (\text{Inoculante})] = 1.7211 \% \text{ Si}$$

$$57 \text{ kg} \left(\frac{1.7211 \%}{100 \%} \right) = 0.981 \text{ kg Si}$$

7.- Cantidad de chatarra a suministrar respecto al silicio.

$$57 \text{ kg.} = \text{Ch A} + \text{Ch B}$$

$$\text{Si requerido} = 0.981 \text{ kg}$$

$$0.981 \text{ kg.} = \text{Ch A} + \text{Ch B}$$

A continuación se muestra la tabla número doce en donde se proporciona la información de la composición química de las chatarras de hierro y acero que se utilizaron en este trabajo experimental.

Tabla No.12. Composición química de las chatarras de hierro y acero que se utilizaron en la fusión del hierro nodular grado 100-70-03 con el nodularizante Noduloy R9.

Composición Química (%)	Grado 100-70-03 (%)	Promedio	Ch A Hierro (%)	Ch B Acero (%)
C	3.5-3.8	3.7	3.8	0.0403
Si	2.2-2.7	2.45	2.715	0.0143
Mn	0.6 max		0.556	0.2126
P	0.05 max			
S	0.015 max		0.0214	0.0078
Cr	0.1 max			
Ni	-			
Cu	0.2-0.50			



$$\text{Ch A} = 57 \text{ kg} - \text{Ch B}$$

$$0.981 \text{ kg.} = (57 \text{ kg} - \text{Ch B}) \left(\frac{2.715\%}{100\%} \right) + \text{Ch B} \left(\frac{0.0143\%}{100\%} \right)$$

$$0.981 \text{ kg.} = (57 \text{ kg} - \text{Ch B})(0.02715) + \text{Ch B} (1.43\text{E-}4)$$

$$0.981 \text{ kg} = 1.54755 \text{ kg} - (\text{ChB } 0.02715) + \text{Ch B} (1.43 \text{ E-}4)$$

$$0.981 \text{ kg} = 1.54755 \text{ kg} + \text{ChB} ((1.43 \text{ E-}4) - 0.02715)$$

$$0.981 \text{ kg} = 1.54755 + \text{Ch B} (-0.027007)$$

$$0.981 \text{ kg} - 1.54755 \text{ kg} = (-0.027007) \text{ Ch B}$$

$$\text{Ch B} = \left(\frac{-0.56655}{-0.027007} \right)$$

$$\text{Ch B} = 20.977$$

$$\text{Ch A} = 57 \text{ kg} - \text{Ch B}$$

$$\text{Ch A} = 57 \text{ kg} - 20.977 \text{ kg}$$

$$\text{Ch A} = 36.023 \text{ kg}$$

Cantidad de kilogramos a suministrar de cada chatarra para la fusión.

$$57 \left\{ \begin{array}{l} \text{Ch A} = 36.023 \text{ kg} \\ \text{Ch B} = 20.977 \text{ kg} \end{array} \right\}$$

AJUSTE DE ELEMENTOS DE ACUERDO AL BALANCE DE CARGA

1) Carbono

$$C_{Kg A} \quad 36.023 \text{ kg} \left(\frac{3.8}{100\%} \right) = 1.3688 \text{ kg}$$

$$C_{Kg B} \quad 20.977 \text{ kg} \left(\frac{0.0403\%}{100\%} \right) = 8.4537 E - 3 \text{ kg}$$

$$C_T = 1.37725 \text{ kg}$$

$$C_{requerido} = 3.7\%$$

$$57 \text{ kg} \left(\frac{3.7\%}{100\%} \right) = 2.109 \text{ kg}$$

$$2.109 \text{ kg} \left(\frac{100\%}{94\%} \right) = 2.2436 \text{ kg}$$

Para compensar la pérdida de carbono durante la fusión se agrega el 0.3% de carbono.

$$57 \text{ kg} \left(\frac{0.3\%}{100\%} \right) = 0.171 \text{ kg}$$

$$2.2436 \text{ kg.} + 0.171 \text{ kg.} = 2.4146 \text{ kg}$$

$$2.4146 \text{ kg} - 1.37725 \text{ kg} = 1.03735 \text{ kg} \quad \text{Recarburante}$$

2) Manganeso

$$Mn_{Kg A} \quad 36.023 \text{ kg} \left(\frac{0.556\%}{100\%} \right) = 0.20028 \text{ kg}$$

$$Mn_{Kg B} \quad 20.977 \text{ kg} \left(\frac{0.2126\%}{100\%} \right) = 0.04459 \text{ kg}$$

$$Mn_T = 0.2448 \text{ kg.}$$

$$Mn_{requerido} = 0.6\%$$



$$57 \text{ kg} \left(\frac{0.6 \%}{100\%} \right) = 0.342 \text{ kg}$$

$$0.342 \text{ kg.} - 0.2448 \text{ kg.} = 0.0972 \text{ kg}$$

$$0.0972 \text{ kg} \left(\frac{100 \%}{73\%} \right) = 0.13315 \text{ kg} \approx 133.15 \text{ g Fe - Mn} 73\%$$

En la tabla número trece se muestra la información de las materias primas que se suministraron en el experimento con el nodularizante Noduloy R9.

Tabla No.13. Relación de los materiales que se utilizaron durante la fusión del hierro nodular con el nodularizante Noduloy R9.

Materia Prima	Cantidad adicionada (kg)	%	C (kg)	Si (kg)	Mn (kg)
Ch. A	36.023	61.031623	1.3688	0.978	0.2
Ch. B	20.977	35.54008149	8.4E-03	0.00299	0.044
Noduloy R9	0.739	1.252043678	0	0.33	0
Recarburante	1.03735	1.75752031	1.03735	0	0
Inoculante Fe-75% Si	0.114	0.193143409	0	0.114	0
Ferro silicio Fe-75% si	0	0	0	0	0
Ferró manganeso Fe - 73% Mn	0.13315	0.225588113	0	0	0.13315
Real	59.0235	100	2.41	1.42499	0.3771
Teórico			2.109	1.3965	0.342



A continuación se presenta la tabla número 14 donde muestra el análisis químico preliminar de la colada.

Tabla No.14 Composición química preliminar de la colada con el nodularizante Noduloy R9.

Composición Química										
Elemento	C	Si	Mn	P	S	Ni	Al	Cu	Mg	Fe
%	3.982	1.086	0.3508	0.0263	0.0234	0.0308	5E-3	0.053	5E-3	94.4

Ajuste de silicio durante la fusión

Silicio requerido 1.7211% y se obtuvo en el preliminar de 1.086%

$$1.7211\% - 1.086\% = 0.6351 \%$$

$$57 \text{ kg} \left(\frac{0.6351 \text{ \%}}{100 \text{ \%}} \right) = 0.362 \text{ kg Si}$$

$$0.362 \text{ kg} \left(\frac{100 \text{ \%}}{75 \text{ \%}} \right) = 0.482 \text{ kg Si} \approx 482 \text{ gFe} - \text{Si } 75 \%$$

Ajuste de manganeso durante la fusión

Manganeso requerido 0.6% y se obtuvo en el preliminar 0.3508%

$$0.6\% - 0.3463\% = 0.2537 \text{ \%Mn}$$

$$57 \text{ kg} \left(\frac{0.2537 \text{ \%}}{100 \text{ \%}} \right) = 0.1446 \text{ kg Mn}$$

$$0.1446 \text{ kg} \left(\frac{100 \text{ \%}}{73 \text{ \%}} \right) = 0.1980 \text{ kg Mn} \approx 198 \text{ gFe} - \text{Mn } 73 \%$$



3.6 Etapa 3

Corte, desbaste y preparación metalográfica para la caracterización de las piezas.

- Después de la fusión se dejaron enfriar las piezas dentro del molde y después se desmoldan las piezas de la arena.
- Los ramales (piezas con sistema de colada) se separaron según la colada y se cortaron del ramal las piezas que se fabricaron en forma de placa.
- Las piezas fabricadas en forma de placa se les realizó un corte para análisis metalográfico, cuya zona a analizar fue la misma para todas las piezas, las muestras que se sometieron a estudio metalográfico fueron seccionadas del centro de la pieza (cara de sección del metal en color amarilla que se analizó) como se muestra en la figura No 4.

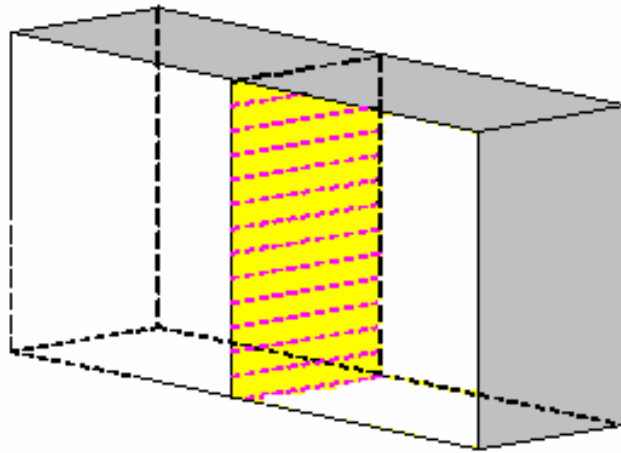


Figura No. 4. Sección cortada para análisis metalográfico.

- Para el análisis metalográfico las piezas se desbastaron con lijas grados; 250, 320, 400 y 600.
- Las piezas se pulieron en un paño grueso con alúmina de 1.0 micra.
- Las piezas se pulieron en un paño fino con alúmina de 0.3 micra.
- Las piezas fueron observadas en el microscopio para verificar el pulido en un aumento de 100 X.



- Las piezas se pulieron como último en un paño fino utilizando una suspensión de diamante de 0.3 micra.
- Las piezas fueron observadas en microscopio y se capturó su imagen sin ataque.
- Las piezas fueron atacadas con nital 3 para ver la matriz de la pieza en el microscopio a 100 X y se capturó su imagen.



3.7 Etapa 4

Evaluación metalográfica de las piezas.

- Teniendo las piezas ya seleccionadas por experimento, colada y pieza se procedió a la evaluación.

En la tabla número quince se muestra la información de la identificación de piezas metalográficas analizadas del experimento con el nodularizante Noduloy R6

Tabla No.15. Identificación de piezas del experimento con el nodularizante Noduloy R6 para el estudio metalográfico

Identificación de piezas con el nodularizante Noduloy R6				
Colada	Pieza A	Pieza B	Pieza C	Pieza D
Colada 1	R6:Co 1: A1	R6:Co 1: B1	R6:Co 1: C1	R6:Co 1: D1
Colada 2	R6:Co 2: A2	R6:Co 2: B2	R6:Co 2: C2	R6:Co 2: D2
Colada 3	R6:Co 3: A3	R6:Co 3: B3	R6:Co 3: C3	R6:Co 3: D3
Nodularizante en el experimento : # Colada : # Pieza				



A continuación la tabla número dieciséis se muestra la información de la identificación de piezas metalograficas analizadas del experimento con el nodularizante Noduloy R6.

Tabla No.16. Identificación de piezas del experimento con el nodularizante Noduloy R9 para el estudio metalográfico.

Identificación de piezas con el nodularizante Noduloy R9				
Colada	Pieza A	Pieza B	Pieza C	Pieza D
Colada 1	R9:Co 1: A1	R9:Co 1: B1	R9:Co 1: C1	R9:Co 1: D1
Colada 2	R9:Co 2: A2	R9:Co 2: B2	R9:Co 2: C2	R9:Co 2: D2

Nodularizante en el experimento : # Colada : # Pieza

- Se utilizo un microscopio para observar las piezas a un aumento de 100X.
- Las piezas se observaron en el microscopio sin ataque químico para evaluar las siguientes características de acuerdo al patrón de nodularización:

Porcentaje de nodularidad.

Tamaño de nódulos.

Densidad de nódulos.



- Las piezas se observaron en el microscopio con el ataque químico (NITAL 3) para evaluar las siguientes características de acuerdo al patrón de nodularización:

Matriz.

Porcentaje de carburos.



4.1 Composición Química Final con el Nodularizante Noduloy R6

En la tabla número diecisiete se reportan los datos obtenidos finales de composición química así como los datos de temperatura registrados durante la fusión.

Tabla No.17. Composición química final de las coladas y temperaturas de tratamiento del experimento donde se utilizo el nodularizante Noduloy R6.

Nodularizante Noduloy R6: colada 1							
Elemento	C	Si	Mn	P	S	Mg	Fe
%	3.583	2.53	0.555	0.00218	0.014	0.0285	92.9
Peso de la colada 18.3 kg.							
Nodularizante Noduloy R6: colada 2							
Elemento	C	Si	Mn	P	S	Mg	Fe
%	3.708	2.42	0.569	0.0217	0.0159	0.0302	92.9
Peso de la colada 22.7 kg.							
Nodularizante Noduloy R6: colada 3							
Elemento	C	Si	Mn	P	S	Mg	Fe
%	3.377	3.26	0.550	0.0229	0.0126	0.0650	92.4
Peso de la colada 11.4 kg.							
Datos de temperatura que se usaron durante la experimentación donde se utilizo el nodularizante Noduloy R6.							
TEMPERATURAS (°C)		Colada 1	Colada 2	Colada 3			
Temperatura en el horno		1582	1658	1591			
Temperatura de vaciado en el convertidor		1490	1479	1427			
Temperatura antes del tratamiento		1490	1479	1427			
Temperatura después del tratamiento		1374	1327	1351			



4.2 Porcentaje de Magnesio Recuperado con el Nodularizante Noduloy R6

1.- Composición química final en gramos respecto con el peso total de las piezas.

Colada 1

$$\text{Composición química en kg. (R6)} = 18.3\text{kg} \left(\frac{0.0285\%}{100\%} \right) (1000\text{g})$$

$$\text{Composición química en g. (R6)} = 5.2155$$

Colada 2

$$\text{Composición química en kg. (R6)} = 22.7\text{kg} \left(\frac{0.0302\%}{100\%} \right) (1000\text{g})$$

$$\text{Composición química en g. (R6)} = 6.8554$$

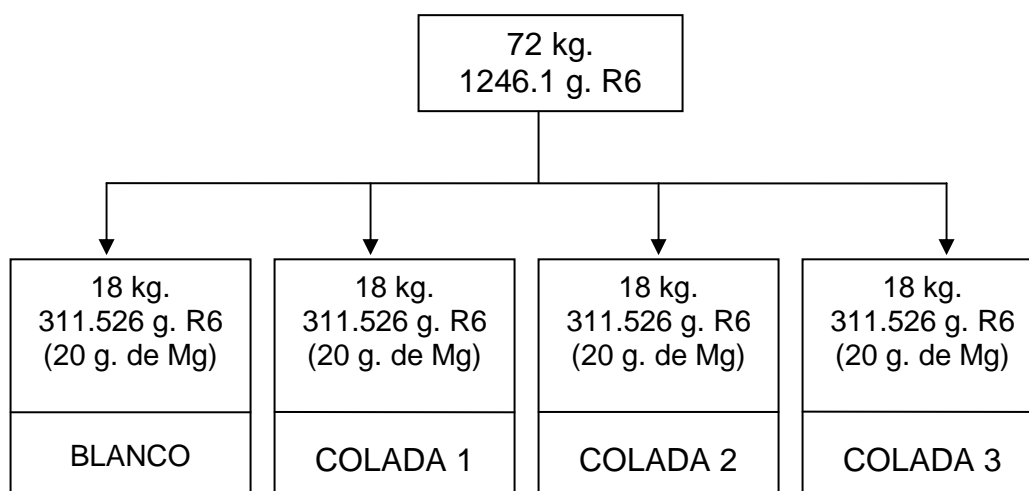
Colada 3

$$\text{Composición química en kg. (R6)} = 11.4\text{kg} \left(\frac{0.065\%}{100\%} \right) (1000\text{g})$$

$$\text{Composición química en g. (R6)} = 7.41$$

2.- Gramos de magnesio adicionados.

La cantidad adicionada de magnesio requerido en forma de nodularizante para un balance de carga de 18 Kilogramos fue de 20 gramos por colada.





3.- Eficiencia del magnesio recuperado.

Colada 1

$$\text{Eficiencia de magnesio recuperado (R6)} = 100\% \left(\frac{5.2155 \text{ g}}{20 \text{ g}} \right)$$

$$\text{Eficiencia de magnesio recuperado (R6)} = 26.0775\%$$

Colada 2

$$\text{Eficiencia de magnesio recuperado (R6)} = 100\% \left(\frac{6.8554 \text{ g}}{20 \text{ g}} \right)$$

$$\text{Eficiencia de magnesio recuperado (R6)} = 34.277\%$$

Colada 3

$$\text{Eficiencia de magnesio recuperado (R6)} = 100\% \left(\frac{7.41 \text{ g}}{20 \text{ g}} \right)$$

$$\text{Eficiencia de magnesio recuperado (R6)} = 37.05\%$$

A continuación en la tabla dieciocho se muestran los datos relacionados con la eficiencia del magnesio recuperado en el experimento donde se utilizó el el nodularizante Noduloy R6.

Tabla No 18. Relación de datos para la eficiencia de magnesio recuperado en el experimento donde se utilizó el nodularizante Noduloy R6.

Resultados con el Nodularizante Noduloy R6			
Datos calculados	Colada 1	Colada 2	Colada 3
Peso de la colada (kg.)	18.3	22.7	11.4
Composición Química final de magnesio (%)	0.0285	0.0302	0.065
Composición Química final de magnesio en gramos (g.)	5.2155	6.8554	7.41
Cantidad de gramos de Magnesio total adicionados en la colada (g.)	20	20	20
Eficiencia de magnesio recuperado (%)	26.0775	34.277	37.05



4.3 Composición Química Final con el Nodularizante Noduloy R9

En la tabla número diecinueve se reportan los datos obtenidos finales de composición química así como los datos de temperatura registrados durante la fusión.

Tabla No.19. Composición química final de las coladas y temperaturas de tratamiento del experimento donde se utilizo el nodularizante Noduloy R9.

Nodularizante Noduloy R9 : colada 1							
Elemento	C	Si	Mn	P	S	Mg	Fe
%	3.701	2.343	0.527	0.0217	0.0138	0.0308	93.2
Peso de la colada 22.2 kg.							
Nodularizante Noduloy R9 :colada 2							
Elemento	C	Si	Mn	P	S	Mg	Fe
%	3.636	2.44	0.538	0.027	0.0174	0.0343	93.1
Peso de la colada 20.06 kg.							
Datos de temperatura que se usaron durante la experimentación donde se utilizo el nodularizante noduloy R9.							
TEMPERATURAS (°C)		Colada 1		Colada 2			
Temperatura en el horno		1559		1500			
Temperatura de vaciado en el convertidor		1480		1400			
Temperatura antes del tratamiento		1417		1383			
Temperatura después del tratamiento		1380		1265			



4.4 Porcentaje de Magnesio Recuperado con el Nodularizante Noduloy R9

1.- Composición química final en gramos respecto con el peso total de las piezas.

Colada 1

$$\text{Composición química en kg. (R9)} = 22.2\text{kg} \left(\frac{0.0308\%}{100\%} \right) (1000\text{g})$$

$$\text{Composición química en g. (R9)} = 6.8376$$

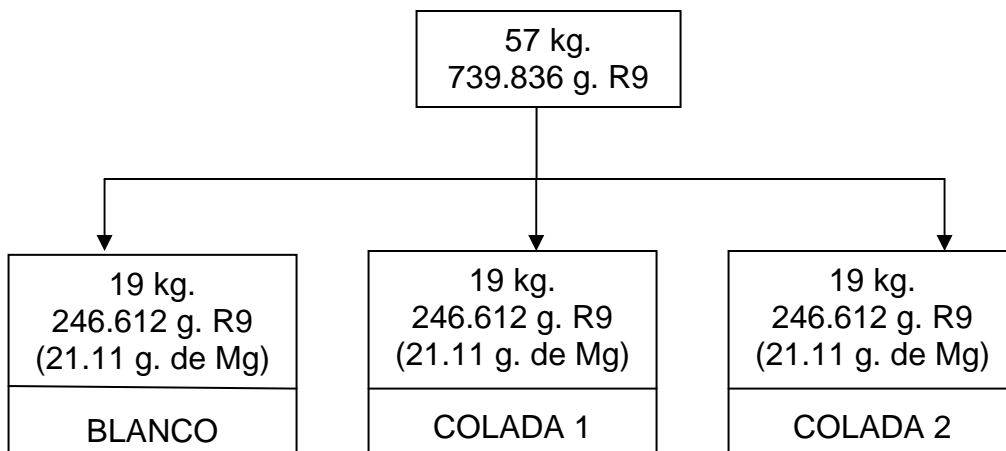
Colada 2

$$\text{Composición química en kg. (R9)} = 20.06\text{kg} \left(\frac{0.0343\%}{100\%} \right) (1000\text{g})$$

$$\text{Composición química en g. (R9)} = 6.88058$$

2.- Gramos de magnesio adicionados.

La cantidad adicionada de magnesio requerido en forma de nodularizante para un balance de carga de 19 Kilogramos fue de 21.11 gramos por colada.





3.- Eficiencia del magnesio recuperado.

Colada 1

$$\text{Eficiencia de magnesio recuperado (R9)} = 100\% \left(\frac{6.8376 \text{ g}}{21.11 \text{ g}} \right)$$

$$\text{Eficiencia de magnesio recuperado (R9)} = 32.3903363 \%$$

Colada 2

$$\text{Eficiencia de magnesio recuperado (R9)} = 100\% \left(\frac{6.88058 \text{ g}}{21.11 \text{ g}} \right)$$

$$\text{Eficiencia de magnesio recuperado (R9)} = 32.5939365 \%$$

A continuación en la tabla veinte se muestran los datos relacionados con la eficiencia del magnesio recuperado en el experimento donde se utilizo el el nodularizante Noduloy R9.

Tabla No 20. Relación de datos para la eficiencia de magnesio recuperado en el experimento donde se utilizó el nodularizante Noduloy R9.

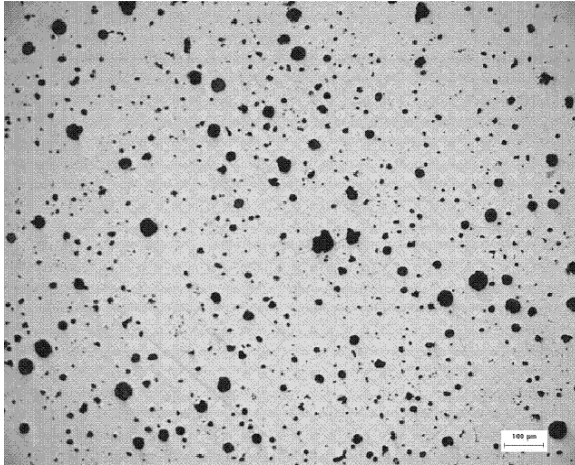
Resultados con el Nodularizante Noduloy R9		
Datos calculados	Colada 1	Colada 2
Peso de la colada (kg.)	22.2	20.06
Composición Química final de magnesio (%)	0.0308	0.0343
Composición Química final de magnesio en gramos (g.)	6.837	6.880
Cantidad de gramos de Magnesio total adicionados en la colada (g.)	21.11	21.11
Eficiencia de magnesio recuperado (%)	32.390	32.593



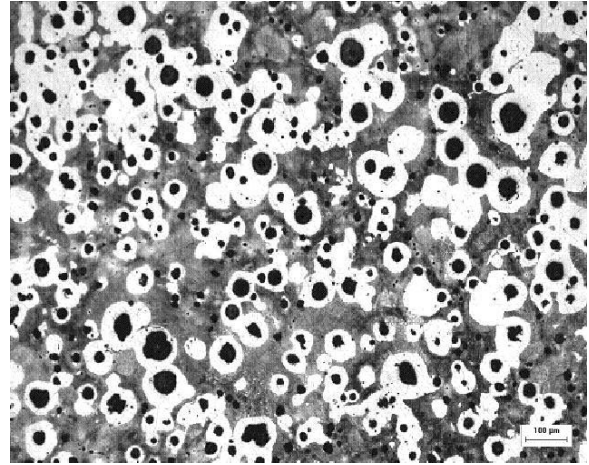
4.5 Replicas Metalográficas

4.5.1 Experimento con el nodularizante Noduloy R6

Colada 1; Placa de espesor 3.9 cm.
R6: Co 1: D1

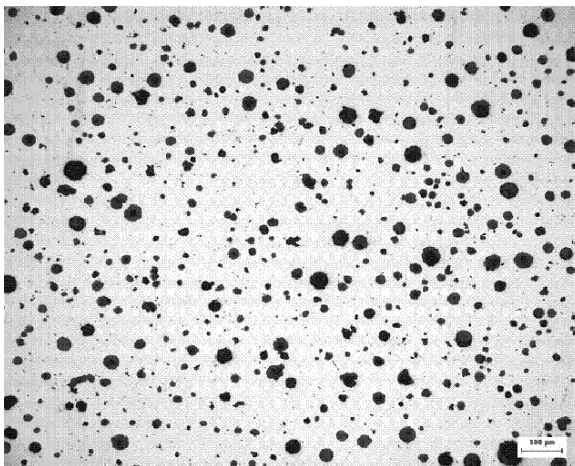


Metalografía Sin Ataque Químico

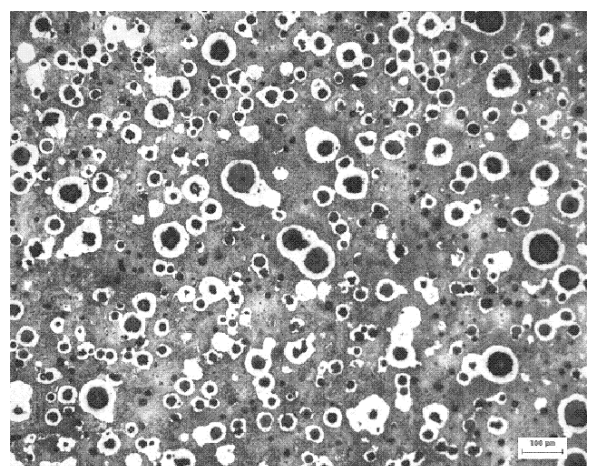


Metalografía Con Ataque Químico

Colada 1; Placa de espesor 1.9 cm.
R6: Co 1: C1



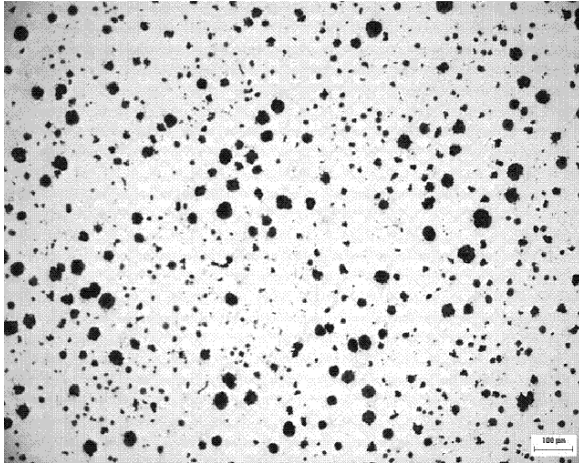
Metalografía Sin Ataque Químico



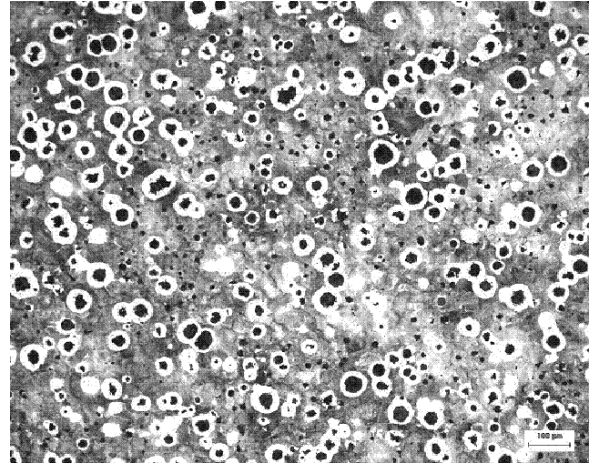
Metalografía Con Ataque Químico



Colada 1; Placa de espesor 1.0 cm.
R6: Co 1: B1

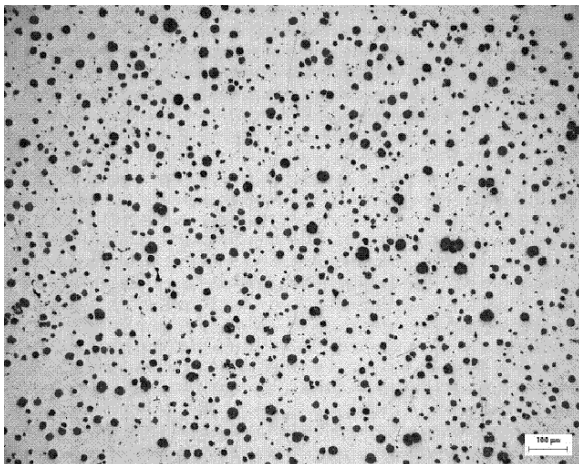


Metalografía Sin Ataque Químico

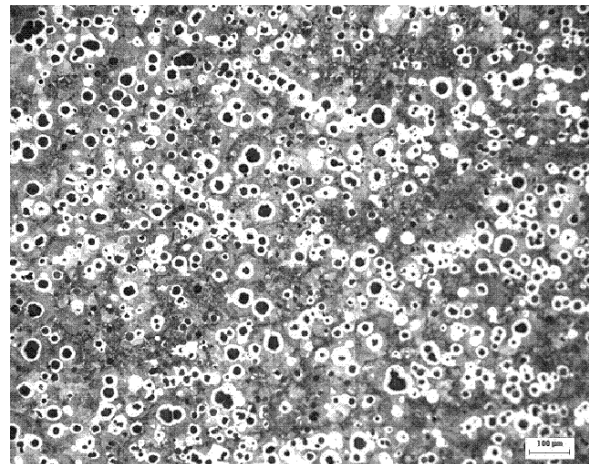


Metalografía Con Ataque Químico

Colada 1; Placa de espesor 0.5 cm.
R6: Co 1: A1



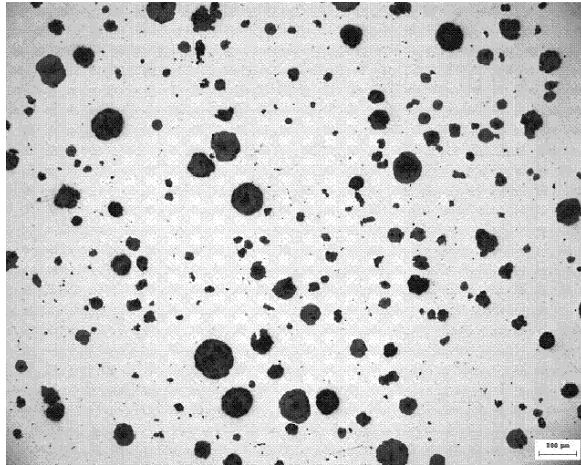
Metalografía Sin Ataque Químico



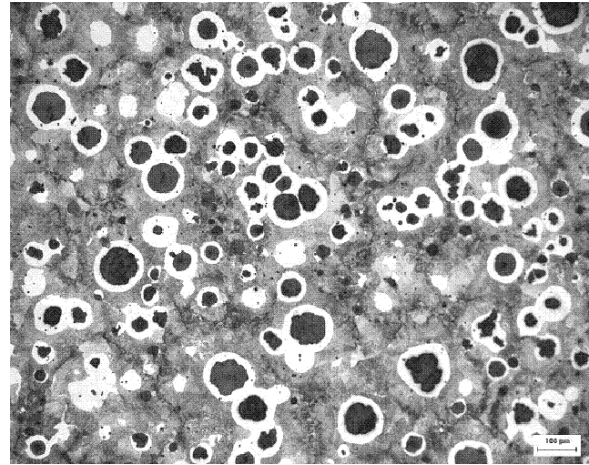
Metalografía Con Ataque Químico



Colada 2; Placa de espesor 3.9 cm.
R6: Co 2: D2

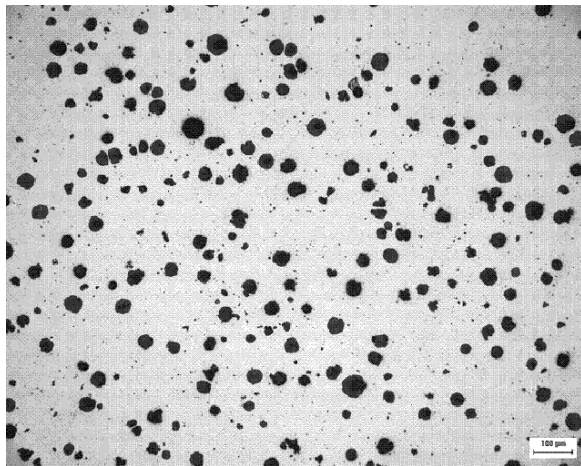


Metalografía Sin Ataque Químico

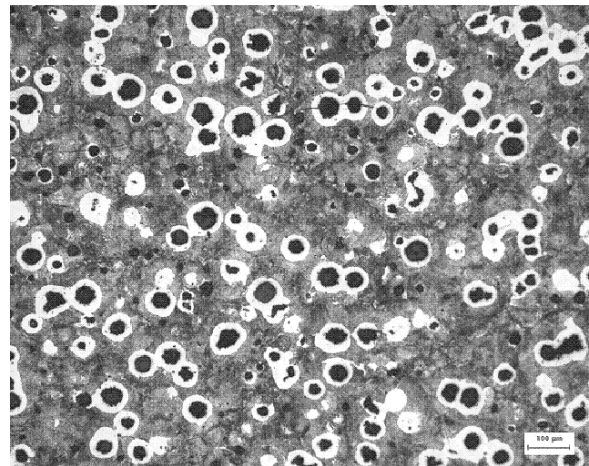


Metalografía Con Ataque Químico

Colada 2; Placa de espesor 1.9 cm
R6: Co 2: C2



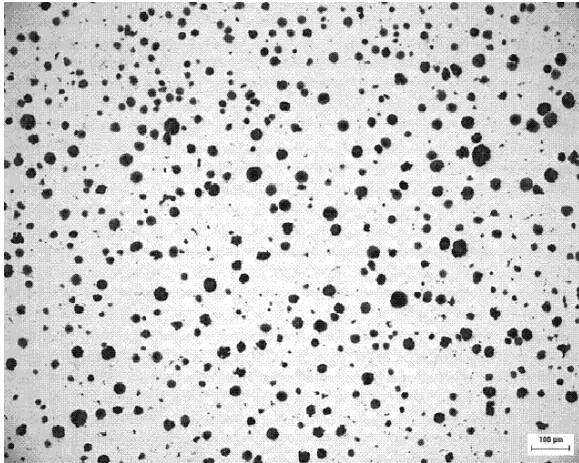
Metalografía Sin Ataque Químico



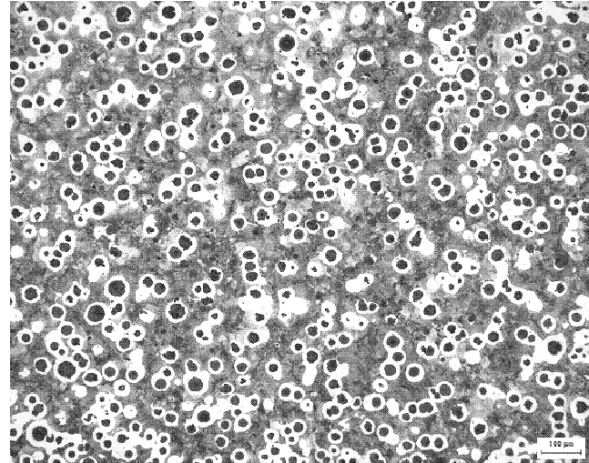
Metalografía Con Ataque Químico



Colada 2; Placa de espesor 1.0cm
R6: Co 2: B2

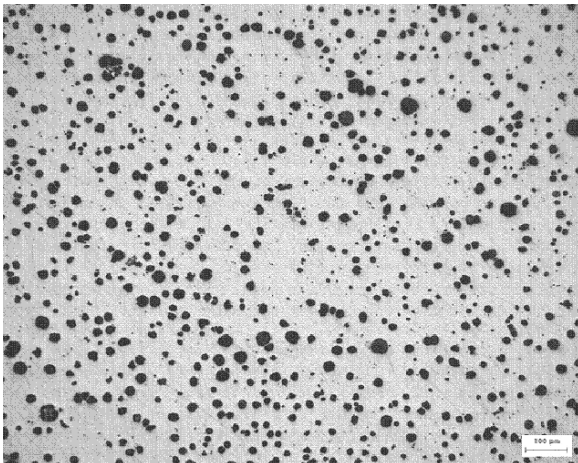


Metalografía Sin Ataque Químico

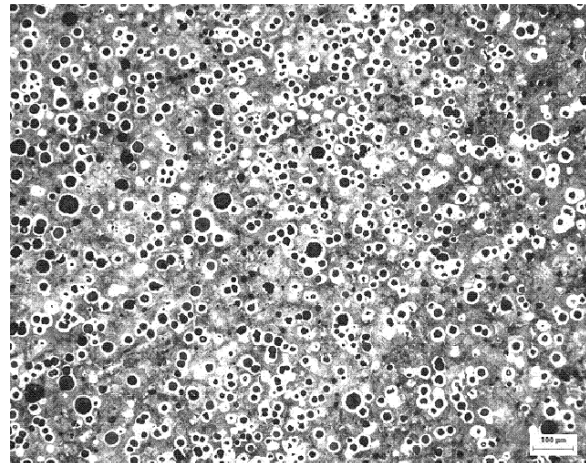


Metalografía Con Ataque Químico

Colada 2; Placa de espesor 0.5cm
R6: Co 2: A2



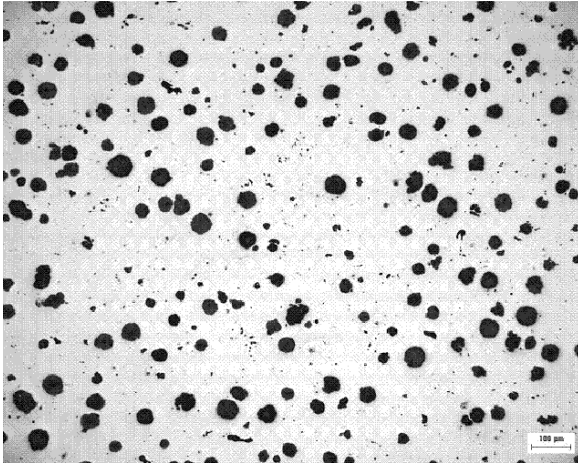
Metalografía Sin Ataque Químico



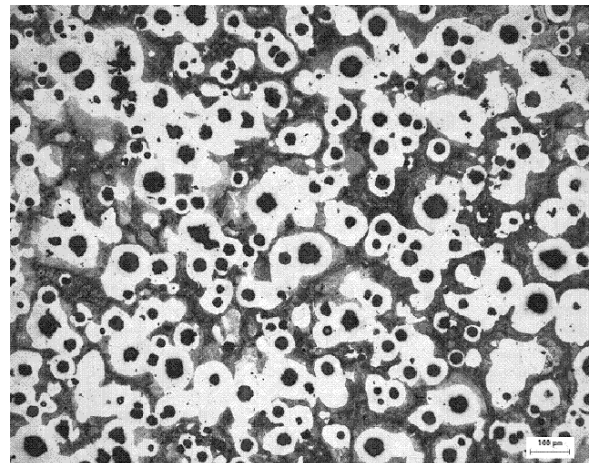
Metalografía Con Ataque Químico



Colada 3; Placa de espesor 3.9cm
R6:Co 3: D3

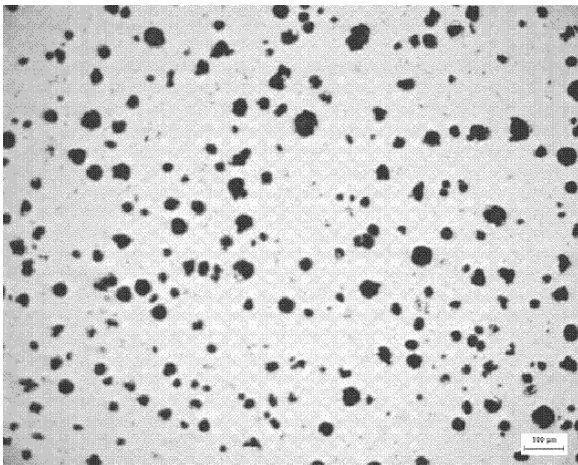


Metalografía Sin Ataque Químico

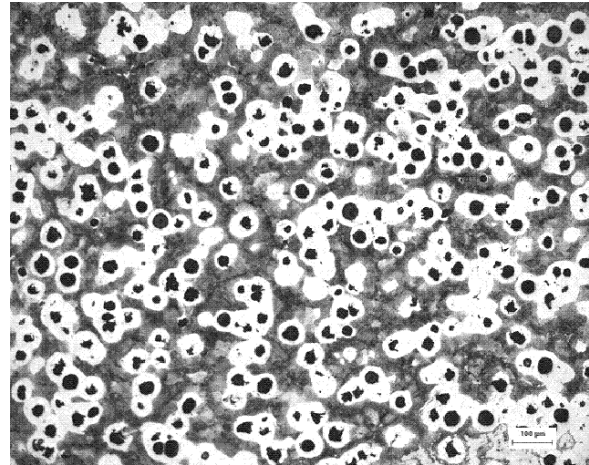


Metalografía Con Ataque Químico

Colada 3; Placa de espesor 1.9cm
R6: Co 3: C3



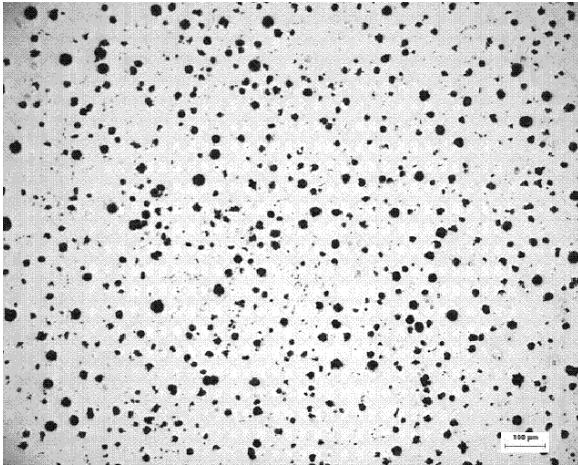
Metalografía Sin Ataque Químico



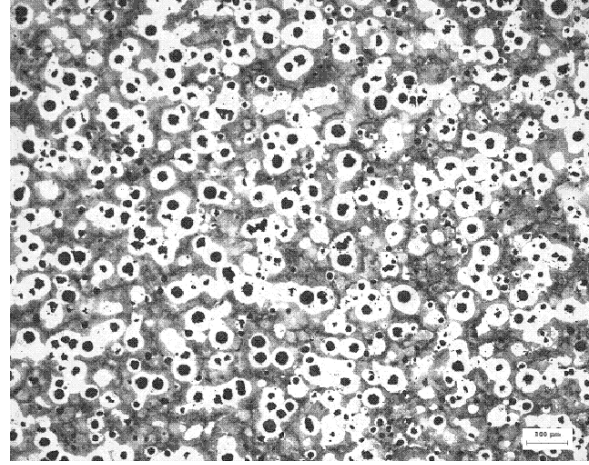
Metalografía Con Ataque Químico



Colada 3; Placa de espesor 1.0cm
R6: Co 3: B3

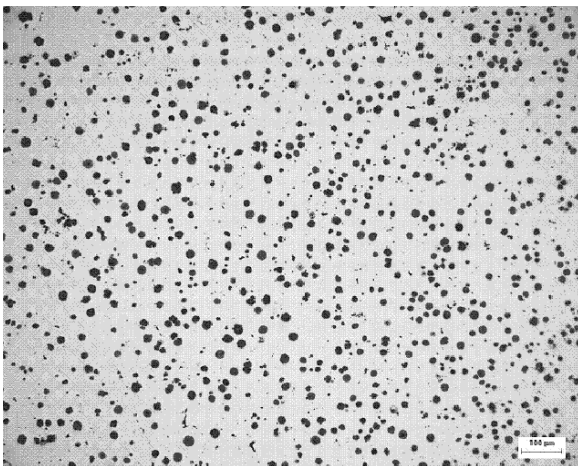


Metalografía Sin Ataque Químico

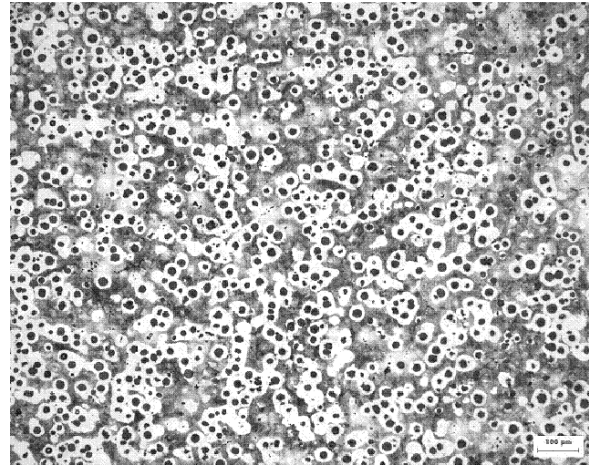


Metalografía Con Ataque Químico

Colada 3; Placa de espesor 0.5cm
R6: Co 3: A3



Metalografía Sin Ataque Químico

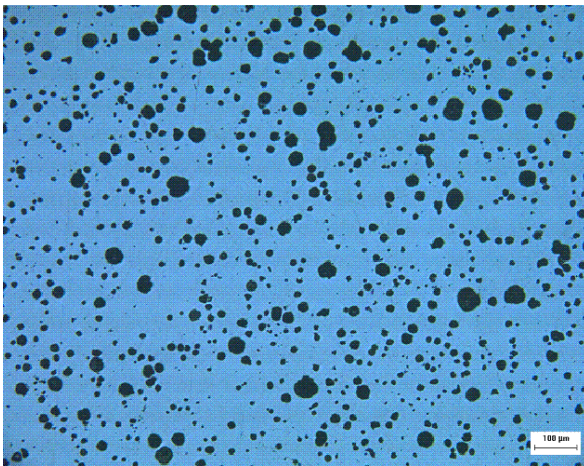


Metalografía Con Ataque Químico

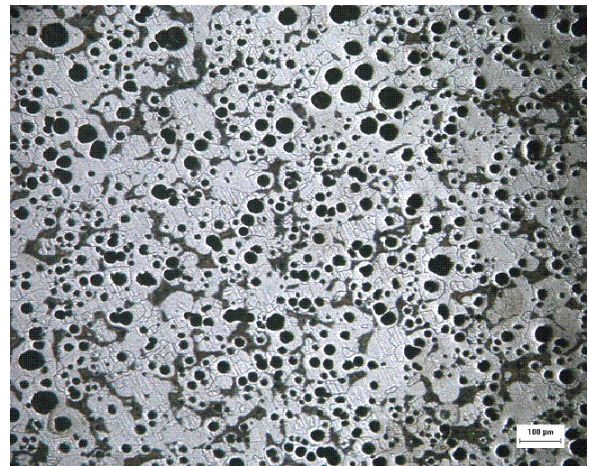


4.5.2 Experimento con el nodularizante Noduloy R9

Colada 1; Placa de espesor 3.9cm
R9:Co 1: D1

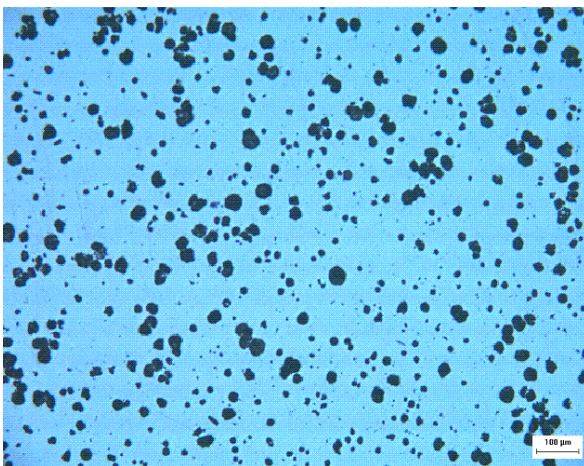


Metalografía Sin Ataque Químico

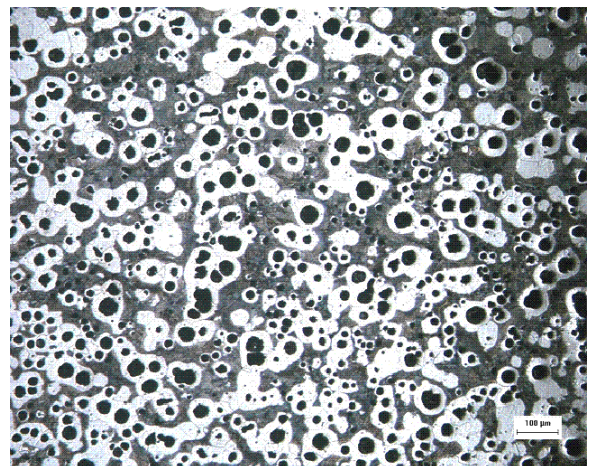


Metalografía Con Ataque Químico

Colada 1; Placa de espesor 1.9cm
R9: Co 1: C1



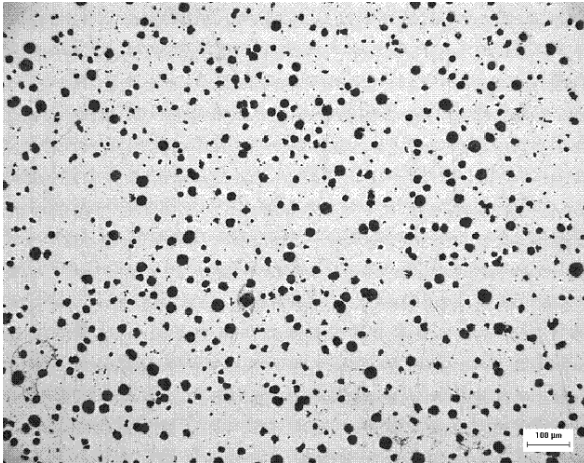
Metalografía Sin Ataque Químico



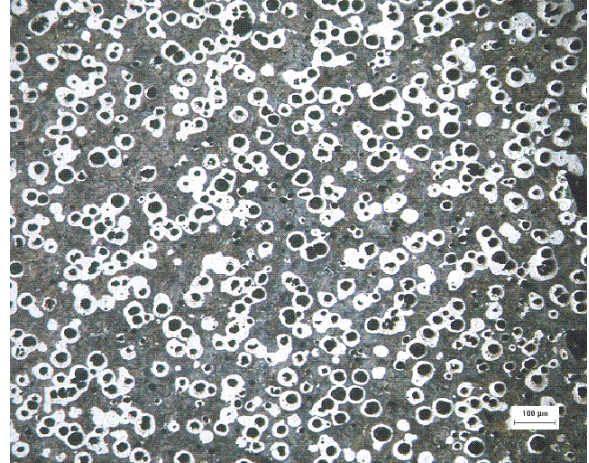
Metalografía Con Ataque Químico



Colada 1; Placa de espesor 1.0cm
R9: Co 1: B1

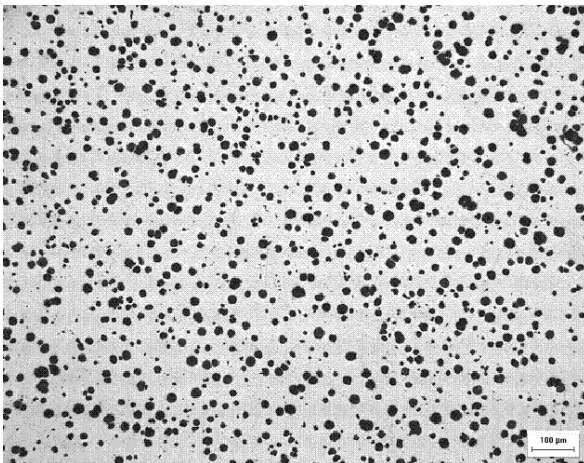


Metalografía Sin Ataque Químico

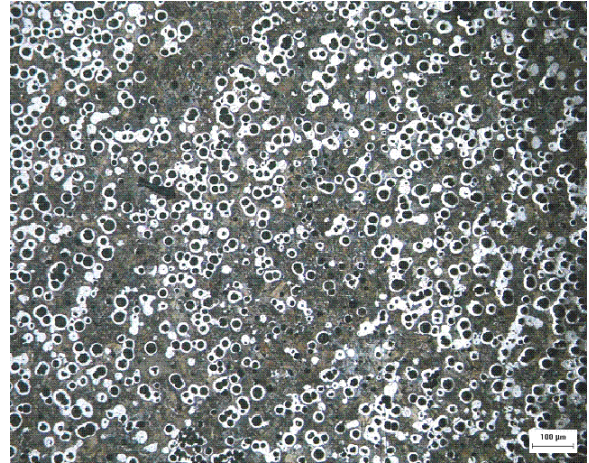


Metalografía Con Ataque Químico

Colada 1; Placa de espesor 0.5cm
R9: Co 1: A1



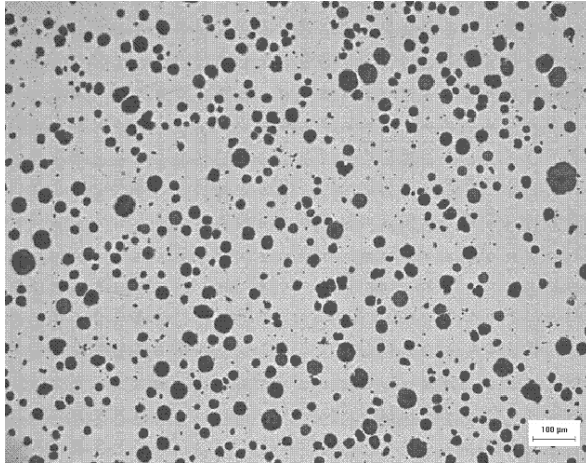
Metalografía Sin Ataque Químico



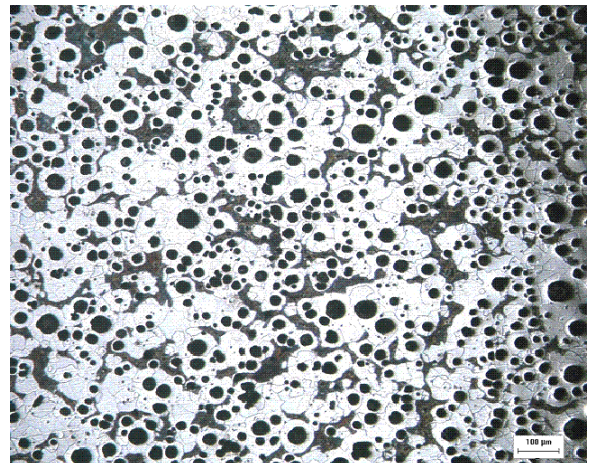
Metalografía Con Ataque Químico



Colada 2; Placa de espesor 3.9cm
R9: Co 2: D2

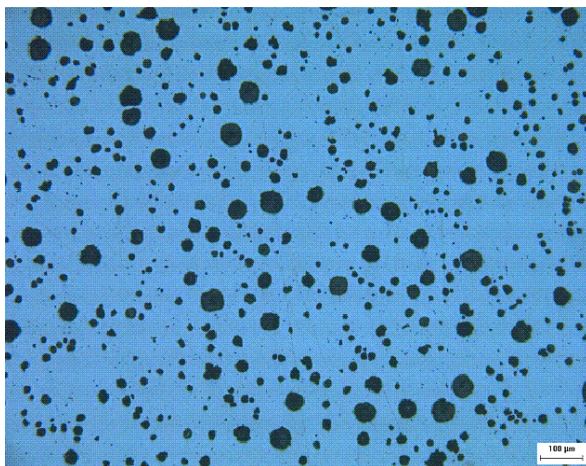


Metalografía Sin Ataque Químico

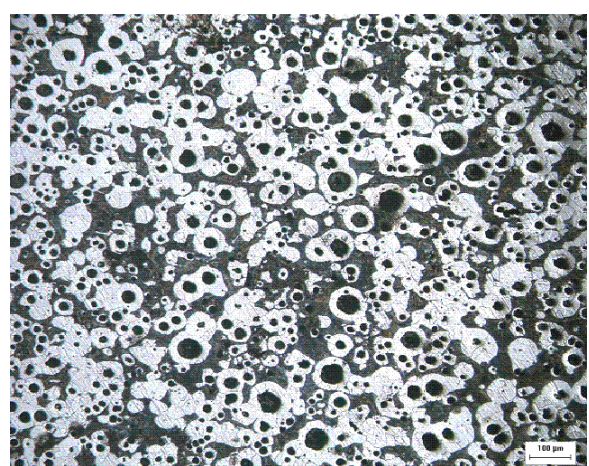


Metalografía Con Ataque Químico

Colada 2; Placa de espesor 1.9cm
R9: Co 2: C2



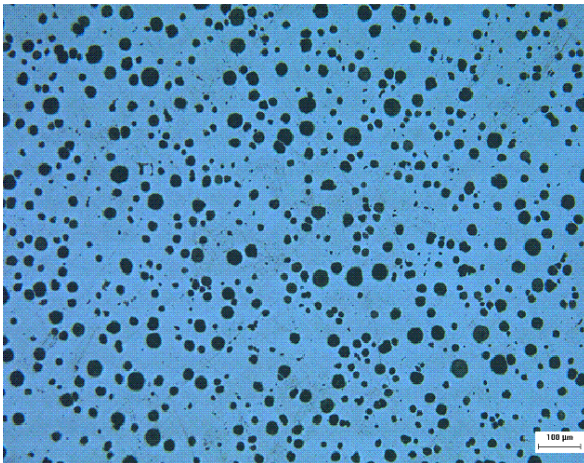
Metalografía Sin Ataque Químico



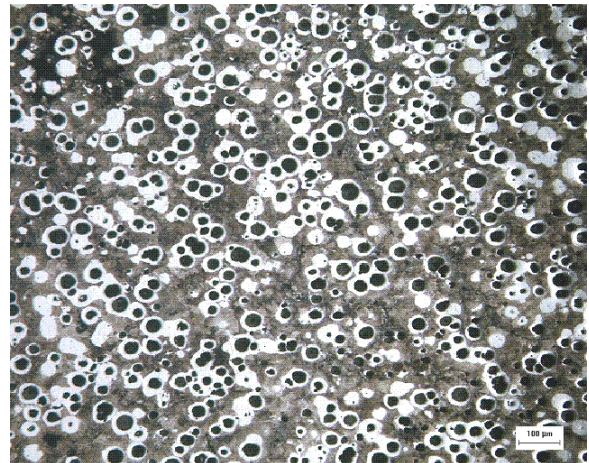
Metalografía Con Ataque Químico



Colada 2; Placa de espesor 1.0cm
R9: Co 2: B2

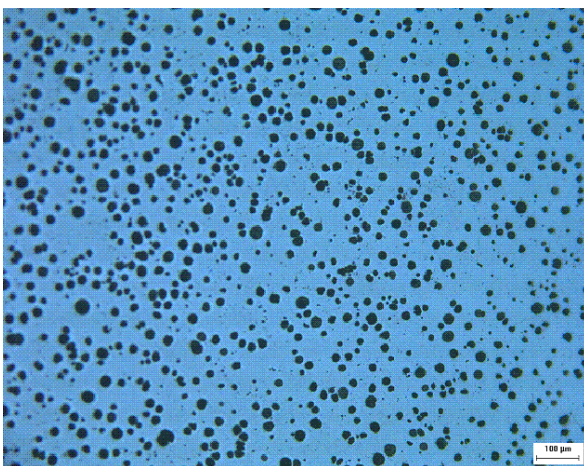


Metalografía Sin Ataque Químico

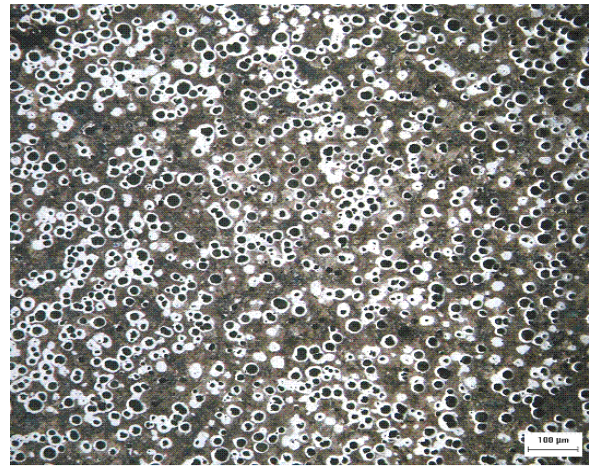


Metalografía Con Ataque Químico

Colada 2; Placa de espesor 0.5cm
R9: Co 2: A2



Metalografía Sin Ataque Químico



Metalografía Con Ataque Químico



4.6 Evaluación Metalográfica de Piezas Fabricadas con el Nodularizante Noduloy R6

En la tabla número veintiuno se reportan los datos obtenidos finales la evaluación metalografica del experimento con el nodularizante Noduloy R6.

Tabla No 21. Evaluación metalográfica de las piezas fabricadas de hierro nodular en el experimento donde se utilizo el nodularizante Noduloy R6.

Colada 1						
Pieza	Espesor (cm)	% Nodularidad	Tamaño de Nódulo	Densidad de Nódulo (nódulos/mm ²)	Estructura De Matriz	% Carburos
R6:Co 1: D1	3.9	90	5	150	50% P-50%Fe	1
R6:Co 1: C1	1.9	90	6	150	75% P-25%Fe	1
R6:Co 1: B1	1.0	80	5	100	50% P-50%Fe	1
R6:Co 1: A1	0.5	100	6	250	50% P-50%Fe	1
Colada 2						
Pieza	Espesor (cm)	% Nodularidad	Tamaño de Nódulo	Densidad de Nódulo (nódulos/mm ²)	Estructura de Matriz	% Carburos
R6:Co 2: D2	3.9	80	5	50	75% P-25%Fe	0
R6:Co 2: C2	1.9	80	5-6	150	75% P-25%Fe	1
R6:Co 2: B2	1.0	90	6	150-200	50% P-50%Fe	1
R6:Co 2: A2	0.5	100	6-7	200	50% P-50%Fe	0
Colada 3						
Pieza	Espesor (cm)	% Nodularidad	Tamaño de Nódulo	Densidad de Nódulo (nódulos/mm ²)	Estructura de Matriz	% Carburos
R6:Co 3: D3	3.9	90	6	150	25% P-75%Fe	0
R6:Co 3: C3	1.9	90	5-6	100	50% P-50%Fe	0
R6:Co 3: B3	1.0	100	6	200	25% P-75%Fe	1
R6:Co 3: A3	0.5	100	6-7	200	25% P-75%Fe	0
Tamaño de nódulo			Dimensión máxima de diámetro a 100 X (mm.)			
4			16			
5			8			
6			4			
7			2			



4.7 Evaluación Metalográfica de Piezas Fabricadas con el Nodularizante Noduloy R9

A continuación en la tabla número veintidos se reportan los datos obtenidos finales la evaluación metalografica del experimento con el nodularizante Noduloy R9.

Tabla No. 22. Evaluación metalográfica de las piezas fabricadas de hierro nodular en el experimento donde se utilizo el nodularizante Noduloy R9.

Colada 1						
Pieza	Espesor (cm)	% Nodularidad	Tamaño de Nódulo	Densidad de Nódulo (nódulos/mm ²)	Estructura de Matriz	% Carburos
R9:Co 1: D1	3.9	95	4-5	100	10% P-90%Fe	0
R9:Co 1: C1	1.9	95	5	100	25% P-75%Fe	0
R9:Co 1: B1	1.0	95	5	200	50% P-50%Fe	0
R9:Co 1: A1	0.5	100	6	250	50% P-50%Fe	1
Colada 2						
Pieza	Espesor (cm)	% Nodularidad	Tamaño de Nódulo	Densidad de Nódulo (nódulos/mm ²)	Estructura de Matriz	% Carburos
R9:Co 2: D2	3.9	100	4-5	200-250	15% P-85%Fe	0
R9:Co 2: C2	1.9	100	6	100	25% P-75%Fe	0
R9:Co 2: B2	1.0	100	6	250	60% P-40%Fe	1
R9:Co 2: A2	0.5	100	6	250	60% P-40%Fe	0
Tamaño de nódulo		Dimensión máxima de diámetro a 100 X (mm.)				
4		16				
5		8				
6		4				
7		2				



Los datos obtenidos de composición química de magnesio como resultado final en el proceso de fabricación de hierro nodular por el método de convertidor de doble cámara en el experimento con el nodularizante Noduloy R6 y con el nodularizante Noduloy R9 nos muestra que con estos porcentajes de magnesio se obtuvo el hierro con el grafito en forma esferoidal.

En la tabla número veintitrés se muestran los datos de composición química de magnesio en cada colada con los nodularizantes Noduloy R6 y R9.

Tabla No. 23. Composición química de magnesio final en cada colada con los nodularizantes Noduloy R6 y R9

Nodularizante	Colada	Composición química final de Magnesio (%)
Noduloy R6	Colada 1	0.0285
	Colada 2	0.0302
	Colada 3	0.0650
Noduloy R9	Colada 1	0.0308
	Colada 2	0.0343

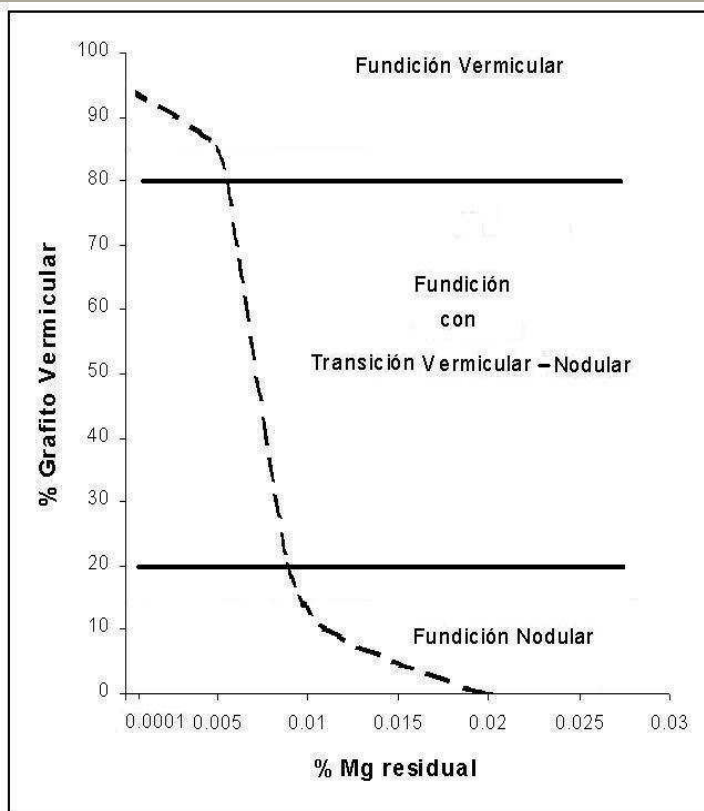


Figura No.5.

Efecto del porcentaje de magnesio residual en la forma del grafito precipitado



La información de composición química de magnesio obtenida de cada experimento, nos indicó una baja recuperación de magnesio en cada colada en comparación de la que queríamos obtener inicialmente ya que en este proceso la recuperación de magnesio determina la eficiencia del método.

Las variables que afectaron para que no se concretara la recuperación al 100 % son; temperatura de tratamiento, eficiencia de los nodularizantes, exceso de material en la colada para el tratamiento y reacciones químicas con elementos presentes como el azufre y oxígeno.

La temperatura es una variable que influyó directamente en la fabricación de este material, ya que al no controlar adecuadamente la temperatura de tratamiento nos indicó una baja recuperación de magnesio, debido a que a una temperatura elevada el magnesio reacciona de una manera violenta y se consume más rápido a diferencia de los tratamientos que se realizaron a baja temperatura en comparación con la temperatura más alta de tratamiento en el experimento.

La composición química de magnesio que contenía cada nodularizante si refleja un cambio notorio ya que en el nodularizante Noduloy R9 presenta mayor retención de magnesio en la colada comparado con las coladas que se realizaron con el nodularizante Noduloy R6.

Al no haber podido controlar la cantidad especificada de metal líquido, para efectuar el tratamiento de nodularización, durante el vaciado del horno de inducción hacia el convertidor de doble cámara presentó un defecto ya que si para el experimento donde el tratamiento era para 18 kilogramos se terminó haciendo para 22 kilogramos dando como resultado que no tendría el mismo efecto la cantidad pesada de nodularizante para 18 kilogramos que para los 22 kilogramos finales obtenidos y pesados, esta deficiencia en el proceso afectó a las coladas en la forma del magnesio residual obtenido.



Durante el proceso de fabricación del hierro nodular la reacción a considerar que implicó la baja eficiencia en el proceso es la que se efectúa entre el azufre y el magnesio ya que el azufre al estar disuelto en el metal líquido reacciona con el magnesio para formar sulfuro de magnesio implicando que una cantidad de magnesio que se utilizaría para producir el hierro nodular pasó a ser parte del sulfuro de magnesio.

La reacción que afectó, produciendo una baja eficiencia de recuperación de magnesio es la reacción con el oxígeno ya que al realizar el tratamiento a alta temperatura donde el magnesio reacciona violentamente y considerando la presencia de oxígeno dentro de la cámara de tratamiento se llega a producir óxido de magnesio implicando que una parte de magnesio adicionado en forma de nodularizante no llegue a reaccionar en el metal líquido sino que reaccione con el oxígeno.

La inoculación dentro de la cámara del convertidor nos ayudó a que fuese más fácil manipular una homogenización en su totalidad de silicio en el metal líquido para la producción de hierro nodular donde al realizar la inoculación dentro del convertidor y la post inoculación en la tina de colada del molde se aseguró la grafitización para obtener el grafito esferoidal en función del magnesio.

Ya sea en el experimento con el nodularizante Noduloy R6 o R9 en este proceso de fabricación de hierro nodular por el método del convertidor, ambos experimentos se vieron afectados por las mismas variables mencionadas donde metalográficamente se pudo observar la diferencia entre cada colada ya que la formación de grafito esferoidal podemos considerarla que está en función de la cantidad de magnesio residual.

En las piezas analizadas metalográficamente por colada en la evaluación de las características de nodularidad, los mejores resultados las obtuvieron las piezas que provenían de la colada que tuvo una mayor eficiencia de recuperación ya sea en las diferentes placas de diferente espesor, las características de nodularidad,



fueron mucho mejor en la colada donde el magnesio residual estaba en mayor porcentaje donde al aumento de magnesio residual nos proporciono un aumento de grafito esferoidal.

A continuación en la tabla número veinticuatro se reportan los datos obtenidos finales de magnesio recuperado con los nodularizantes Noduloy R6 y R9.

Tabla No. 24. Eficiencia de magnesio recuperado en los experimentos donde se utilizo el nodularizante Noduloy R6 y R9.

NODULLOY R6 (6.42 % Mg)		Colada 1	Colada 2	Colada 3
	Peso de la colada (kg)	18.3	22.7	11.4
	Temperatura de tratamiento (°C)	1490	1479	1427
	Cantidad de magnesio adicionado (g)	20	20	20
	Composición Química Final de Mg (%)	0.0285	0.0302	0.065
	Composición Química Final de Mg (g)	5.2155	6.8554	7.41
	Eficiencia de magnesio recuperado (%)	26.07	34.27	37.05
NODULLOY R9 (8.56 % Mg)		Colada 1	Colada 2	
	Peso de la colada (kg)	22.2	20.06	
	Temperatura de tratamiento (°C)	1417	1383	
	Cantidad de magnesio adicionado (g)	21.11	21.11	
	Composición Química Final de Mg (%)	0.0308	0.0343	
	Composición Química Final de Mg (g)	6.83	6.88	
	Eficiencia de magnesio recuperado (%)	32.39	32.59	



- La fabricación de hierro nodular clase 100-70-03, por el método del convertidor es una opción más para la elaboración de este material, donde al controlar adecuadamente las variables del proceso se puede optimizar la eficiencia de la fabricación del hierro nodular.
- La temperatura en el proceso es un factor que influye, ya que a mayor temperatura de tratamiento el magnesio se llega a consumir en mayor proporción debido a que la temperatura activa con mayor rapidez su reactividad ante el medio ambiente.
- Se concluye que para el Nodularizante Noduloy R9 que contiene mayor porcentaje de magnesio llegó a obtener una cantidad de magnesio residual mucho mejor que el Nodularizante Noduloy R6 dando como resultado un mejor grafito esferoidal.
- El exceso de material de hierro para el tratamiento de nodularización no contemplado afecta a la colada reduciendo el porcentaje de magnesio residual.
- El proceso de nodularización para la elaboración del hierro nodular debe ser estrictamente calculado ya que al no considerar perdidas de magnesio por la reacción que puede ocurrir entre magnesio y azufre presentara un bajo porcentaje de magnesio residual.
- La inoculación dentro de la cámara del convertidor incrementa la homogenización del silicio en el metal líquido, dando como resultado que la eficiencia de grafitización sea la necesaria para la fabricación del hierro nodular.
- Con las cantidades obtenidas de magnesio residual se obtuvo un hierro nodular clase 100-70-03, en caso contrario de haber obtenido valores bajos de magnesio residual como lo ilustra el grafico hubiese implicado que en lugar de obtener grafito esferoidal hubiésemos obtenido un grafito vermicular (Tabla numero 23 y figura 5).
- Para la obtención de un grafito esferoidal hay que considerar impecablemente el magnesio residual ya que si este no se llega a obtener en los rangos especificados no se podrá obtener el hierro nodular y para obtener el magnesio residual requerido hay que controlar las variables; cantidad necesaria de nodularizante para el tratamiento de nodularización, temperatura de tratamiento, material en exceso durante el tratamiento, azufre disuelto en el metal líquido y una buena inoculación.



- [1] Dr. Emilio Jimeno y Dr. Ing. F. Morral, Libro Metalurgia General Extractiva, Física, Mecánica y Química, 1982, Tomo 2, pp. 971 - 996
- [2] Sydney H. Avner, Libro Introducción a la Metalurgia Física, 1979, pp. 421 - 454
- [3] JOSE APRAIZ BARREIRO, LIBRO FUNDICIONES, 1963 2ª EDICIÓN, pp.143 – 164
- [4] Carl G. Johnson, Libro Metalurgia, 1961, pp. 303 - 329
- [5] Ernst Specht y Hans Tanzen Witt, Libro Fundición del Hierro y del Acero, 1957, pp. 457- 285
- [6] J. Pascual, Libro Técnica y Práctica del Tratamiento Térmico de los Metales Férricos, 1970, pp.105 - 111
- [7] Heine, Richard W., Loper jr & Carl R. Rosenthal, Philip C., *Principles of Metal Casting*, 2ª Edition, USA, 1967, pp 49-1 648.
- [8] American Society for Metals, , Metals Handbook, Vol. 15, Casting, USA, 9ª ed., 1992, pp 668-676.
- [9] Tratamiento del metal fundido
www.arqhys.com/contenidos/metal-tratamiento.html
(Noviembre 2009)
- [10] Producción de hierro fundido con el grafito esferoidal,
www.monografias.com/trabajos20/hierro-nodular/hierro-nodular.shtml
(Noviembre 2009)
- [11] Hierros aleados resistentes al desgaste
www.monografias.com/trabajos15/hierros-aleados/hierros-aleados.shtml/EFEECTO
(Noviembre 2009)
- [12] Cuevas Ayala Carlos, Métodos de Producción de Hierro Compacto y Nodular, Tesis de Licenciatura, Facultad de Química, UNAM, pp. 27-28, 1997
- [13] El Tratamiento de los Hierros Nodulares en el Mejoramiento de los Materiales en la Industria Automotriz, Miguel Antonio Acosta Esqueda, Miguel Martínez Madrid, José Alfredo López, Publicación Técnica No. 148, Sanfandila, Qro, 2000.
- [14] Estudio y ensayos de los materiales, Fundición Nodular, Trabajo practico, Facultad Católica de Química e Ingeniería “Fray Rogelio Bacon”,2008.