

00522  
16

A



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

PRODUCCIÓN DE HIERRO NODULAR CON Fe-Si-5%Mg  
A PARTIR DEL DISEÑO DE UN CONVERTIDOR DE  
DOBLE CÁMARA

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO  
P R E S E N T A:  
AGUSTÍN GERARDO RUIZ TAMAYO



MÉXICO, D.F.



2003

EXAMENES PROFESIONALES  
FACULTAD DE QUÍMICA



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.

# **PAGINACION DISCONTINUA**


B

**JURADO ASIGNADO:**

**Presidente:** Prof. José Alejandro García Hinojosa  
**Vocal:** Prof. José Guadalupe Ramírez Vieyra  
**Secretario:** Prof. Adrián Manuel Amaro Villeda  
**1er. Suplente:** Prof. Juan Manuel de la Rosa Canales  
**2do. Suplente:** Prof. Eusebio Cándido Atlatenco Tlapanco

**Sitio donde se desarrollo el tema:**  
**Laboratorio de fundición.**  
**Departamento de Ingeniería Metalúrgica.**  
**Facultad de Química, edificio D Ciudad Universitaria, UNAM.**

**Asesor del tema:**   
 I.Q.M. Adrián Manuel Amaro Villeda

**Supervisor técnico:**   
 I.Q.M. Eusebio Cándido Atlatenco Tlapanco.

**Sustentante:**   
 Agustín Gerardo Ruiz Tamayo

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas  
 UNAM a difundir en formato electrónico el  
 contenido de mi trabajo.

NOMBRE: Agustín Gerardo Ruiz Tamayo  
 FECHA: 24 de abril del 2003  
 FIRMA: Agustín Gerardo Ruiz Tamayo

## **Dedicatorias.**

### **A DIOS:**

*Por darme la oportunidad de seguir viviendo y por estar siempre conmigo.*

### **A MIS PADRES:**

**José Luis Ruiz Rodríguez.**

**María Tamayo de Ruiz.**

*Gracias primeramente por darme la vida y mucho amor, por tenerme confianza y por apoyarme en todo, aunque no estoy con ustedes físicamente, siempre los llevo en mi corazón, simplemente son mi todo, los **AMO**.*

### **A MIS HERMANOS.**

*Juan Luis, María Magdalena, Martha Patricia y José, por todos los momentos que vivimos juntos, por que siempre estuvieron al pendiente de mi situación, y quiero que siempre les quede el orgullo y la satisfacción que gracias a ustedes, sigo creciendo y superándome como persona.*

### **A ELENA GPE. ELIZARRARÁS HERRERA.**

*Por darme cariño, amor, comprensión, motivación y por todos los momentos buenos y malos que hemos pasado juntos, eres una mujer maravillosa.*

### **Al Doctor José Rafael Elizarrarás García y su señora esposa Maria Elena Herrera de Elizarrarás y sus hijos Fernando Rafael y Rodrigo Alfonso.**

*Gracias por todo su apoyo y por brindarme su ayuda cuando más la necesite, y por ser unas excelentes personas.*

### **A MIS ABUELOS.**

*Trinidad Romo, por su cariño y sus bendiciones que recibo a diario.*

*Elena Rodríguez (QEPD) y Agustín Ruiz (QEPD), que en donde quiera que se encuentren, este logro se los dedico de corazón.*

### **A MIS TIOS.**

*Florentino y Oliva, Alejandra, Lupita y Ernesto, Margarita, por que con ustedes inicié en el camino donde estoy ahora, gracias por todo su apoyo.*

*Arturo y Jesús, Armando y Male, Socorro y Raquel, Trinidad y Felipe (QEPD), Joel y Teresa, y mi madrina Jesús.*

*Ricardo y Alejandra, Víctor e Irene.*

### **A MIS PRIMOS.**

*Claudia, Florentino, Montserrat, Arturo, Carmelita, Male, Elena, Alma, Adrián, Rosy, Trinidad, Eric, Trinidad, Rosario, Verónica, Laura, Joel, Álvaro, Aarón, Tete, Sandra, Jorge, Martín, Mónica, Juan, Yeye,*

### **A MIS AMIGOS**

*Armando, Javier, Miguel, Alejandro, Rubén, Alfredo, Yoy, Marcos, Moisés, Jorge, Juan Carlos, Adrián, Francisco, Pedro, Juan, Daniel.*

D

### **Agradecimientos.**

**Al IQM Adrián Manuel Amaro Villeda** por tenerme la confianza de desarrollar este trabajo, por toda su ayuda y por compartir sus conocimientos conmigo, además por ser una excelente persona.

**Al IQM Eusebio Cándido Atlatenco Tlapanco**, por la ayuda brindada en este trabajo y por ser una persona que se preocupa por el bienestar de los alumnos.

#### **A mis profesores.**

Dr. Carlos González Rivera, M. en C. José Alejandro García Hinojosa, M. en C. Antonio Huerta Cerdan, M. en C. Sergio García Galán, IQM Ignacio Beltrán Piña, IQM Gerardo Arámburo, Dr. Antonio Barrera, Dr. Francisco Rodríguez, Dr. Bernardo Hernández, M. en C. Eugenia Noguez, IQM Teresita Robert, M. en C. José Guadalupe Vieyra, IQM Guillermo Salas.

#### **A mis compañeros y amigos.**

Héctor, Jorge, David, Darío, Jeanine, Luz, Sandra, Toño, Andrés, Rene, Miguel Ángel, Humberto, Armando, Víctor, Alejandra, Juan.

#### **A los trabajadores.**

Gabriel Nieto Resendiz, José Enrique Hinojosa Patiño y Pedro Carrera Juárez, por su valiosa ayuda en este trabajo.

<b>ÍNDICE</b>	<b>Pág.</b>
<b>ÍNDICE.</b>	<b>1</b>
<b>PRÓLOGO.</b>	<b>2</b>
<b>INTRODUCCIÓN.</b>	<b>5</b>
<b>I. ANTECEDENTES.</b>	<b>7</b>
<b>II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.</b>	<b>23</b>
<b>III. DISEÑO DEL CONVERTIDOR DE DOBLE CÁMARA.</b>	<b>33</b>
<b>IV. PRODUCCIÓN DE HIERRO NODULAR CON EL CONVERTIDOR DE DOBLE CÁMARA.</b>	<b>38</b>
<b>V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.</b>	<b>54</b>
<b>VI. CONCLUSIONES.</b>	<b>79</b>
<b>VII. RECOMENDACIONES.</b>	<b>80</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.</b>	<b>81</b>
<b>APÉNDICE A. PATRONES DE EVALUACIÓN.</b>	<b>85</b>
<b>APÉNDICE B. DIAGRAMA DE FASES.</b>	<b>102</b>

## PRÓLOGO

El descubrimiento del hierro nodular, dúctil o esferoidal, fue dado a conocer en la presentación hecha en el congreso de la AFS en Filadelfia en 1948. Un rápido desarrollo ocurrió en la década de los cincuenta seguido de un incremento en los sesenta.

Desde la década de los cuarenta comienza la historia sobre la aparición del hierro nodular, es por ello hacer un pequeño recuento de lo que ha acontecido hasta la actualidad<sup>(1)</sup>.

**1943.** Millis quien trabajaba para INCO (International Nickel Co) descubre que el uso de aleaciones de magnesio en hierro fundido produce una estructura de grafito esferoidal.

**1948.** En mayo, Hentos Morrogh de la British Casting Research Institute Association (BCRIA) presenta en el congreso de la AFS una discusión del uso del cerio para la obtención del hierro dúctil. En este mismo año aparece el primer método usado para la introducción de magnesio llamado open ladle.

**1949.** Se producen partes de motores y se introduce en la ASTM la primera especificación para hierros dúctil. La Ford Motor Co. comienza operaciones a nivel planta piloto para la fabricación de hierro dúctil.

**1951.** Ford Motor Co. convierte el 100% de su producción de cigüeñales a hierro dúctil.

**1955.** Para 1955-1975 la industria del hierro dúctil se caracteriza por publicar el conocimiento sobre la reacción del magnesio con el hierro fundido.

**1958.** Se forma la asociación de Ductile Iron Society (DIS).

**1960's.** Se introduce el uso del horno de inducción para la fusión del hierro dúctil. En esta década se introduce el método por inyección para la nodularización del hierro. Además aparece por primera vez al método del Sándwich. En 1966 es introducido a la industria del hierro el método de tapón poroso.

**1970's.** Aparece el método In-Mold, el cual fue desarrollado en Inglaterra por Woody Holden.

**1980's.** En esta década se comienza a emplear el método Tundish.

**1998.** La industria de la fundición celebra el 50 aniversario de la existencia del hierro dúctil y el 40 aniversario de la DIS.

La producción de hierro nodular esta representada en un 33% en la industria automotriz (motores, flechas, etc) y un 46% en tubos para reacciones a alta presión. La demanda de este tipo de hierro dentro de la industria automotriz incrementará en 1.5% anualmente de 1992 al 2002 (gráfica 1).

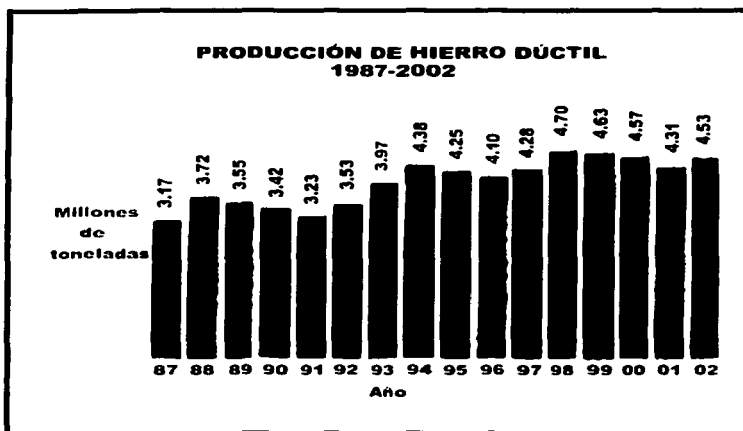
Este incremento en la producción de hierro nodular puede llegar a aumentar aún más, si se consideran los siguientes aspectos:

1. Manteniendo altos niveles de calidad.
2. Siendo competitivo.
3. Promocionando la fundición de hierro nodular a través de las actividades de las asociaciones técnicas.
4. Promoviendo la fundición nodular a través del contacto personal con los usuarios potenciales.



Al promocionar la fundición nodular, se suele hacer hincapié en su ductilidad y tenacidad, la mayoría de las piezas fundidas deben de conservar su forma mientras se hallan en servicio, por riguroso que pueda ser éste. La propiedad que más se valora en la mayoría de los diseños es el límite elástico.

Por regla general, se considera al límite de elasticidad junto con un factor de seguridad en los cálculos técnicos, esta circunstancia viene muy bien por que las fundiciones nodulares son, por lo general, superiores tanto a la fundición gris como al hierro maleable así como al acero aleado, en lo que se refiere a su límite de elasticidad.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Grafica 1. Demanda del hierro dúctil en los últimos 16 años.

La producción de hierro nodular y el número de industrias que lo fabrican en México se muestran a continuación <sup>(2,3,4,5,6)</sup>

Año	Hierro gris	Hierro dúctil	Hierro maleable	Acero	Total
1996	380,000	75,000	25,000	20,000	500,000
1997	654,289	42,000	14,000	61,220	771,509
1998	628,848	43,584	7,200	103,572	783,204
1999	630,539	43,579		103,581	777,699
2000	704,000	56,000		143,000	903,000

Tabla 1. Producción anual en México, expresadas en toneladas métricas.

Año	Hierro	Acero	No ferrosos	Total
1997	102	27	98	227
1998	102	27	145	274
1999	100	27	166	293
2000	736	27	1019	1782

Tabla 2. Número de fundiciones que operan en México.

Por otra parte las combinaciones de bajos costos en comparación con las fundiciones, maquinabilidad, dureza, resistencia a la corrosión, conductividad térmica, resistencia al desgaste, amortiguamiento y esfuerzo, son incomparables entre los diferentes tipos de fundición, la tabla 3 compara las características de los varios tipos de hierro con los aceros<sup>(7)</sup>

PROPIEDAD	H. N.	H. M.	H. G.	A	H. B.
Fabricación	1	2	1	4	3
Maquinabilidad	2	2	1	3	-
Calidad	1	3	5	2	4
Amortiguamiento	2	2	1	4	4
Dureza superficial	1	1	1	3	-
Módulo elástico	1	2	3	1	-
Resistencia al impacto	2	3	5	1	-
Resistencia al desgaste	2	4	3	5	1
Resistencia a la corrosión	1	2	1	4	2
Relación esfuerzo/peso	1	4	5	3	-
Costo de manufactura	2	3	1	4	3

Tabla No 3. Comparación de las características de varios tipos de fundiciones de hierro con acero (0.3% carbono). H.N = Hierro nodular, H:M: = Hierro maleable. H:G: = Hierro gris, A = Acero con 0.3% de carbono, H:B: = Hierro blanco; 1 = Excelente. 5 = malo

De acuerdo a la tabla anterior se observa claramente que el hierro nodular es el que posee las mejores propiedades y es por ello la importancia que se le debe dar para seguir buscando más usos y aplicaciones, y como resultado de esto la producción se incrementará.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## INTRODUCCIÓN.

De acuerdo con la literatura, para la fabricación de hierro nodular es necesario realizar un tratamiento al metal líquido (nodularización), el cual consta de agregar agentes nodulizantes como magnesio, cerio y elementos de la familia de las tierras raras, por lo que el elemento más empleado como agente nodulizante dentro de la industria es el magnesio cuya presentación es en forma de ferrosilicio magnesio ( $\text{Fe-Si-}\chi\text{Mg}$ , donde  $\chi = \% \text{Mg}$ ). La función del magnesio es proporcionar el efecto de la nodularización en el carbono libre que precipita en forma de grafito, es decir, si no se procediera a realizar el tratamiento de nodularización, el carbono libre presente en el metal líquido precipitaría durante la solidificación en forma de hojuela (considerando obviamente la inoculación) lo cual es característico de una fundición gris, con el uso de magnesio el grafito precipita en forma de nódulos (esferoides). El magnesio contenido dentro de la ferro aleación al momento de agregarlo en el baño se llega a perder por volatilización, desoxidante, nodulizante y desulfurante, en el primer caso debido a que la temperatura de ebullición del magnesio (1107 °C) es bajo comparado con la temperatura de trabajo durante la fusión (1400-1450 °C), en el segundo caso va a depender mucho de la formación del óxido de magnesio que esta en función de la cantidad de oxígeno (presente en el metal líquido y en el ambiente) que se llegue a combinar con el magnesio y esto estará en función del proceso o método de nodularización empleado, en el tercer caso una parte del magnesio proporcionara el efecto de la nodularización (magnesio residual) y en el último caso va a depender considerablemente del porcentaje de azufre contenido en el metal líquido por lo que se recomienda que el azufre no exceda del 0.03% debido a que el magnesio reacciona con el azufre en la misma proporción (1:1), lo cual trae como consecuencia una mayor cantidad de nodulizante a utilizar en el tratamiento y una reacción demasiada violenta en la cual se puede presentar una gran proyección del metal líquido, esto traducido en gastos para la empresa no sería rentable. Los objetivos contemplados en este trabajo son los siguientes:

- Diseño y construcción del convertidor de doble cámara con capacidad máxima de 18 kilogramos.
- Establecer una metodología de trabajo y una técnica de fusión que permita desarrollar adecuadamente las fusiones empleando el convertidor de doble cámara.
- Obtención del hierro nodular por el proceso del convertidor de doble cámara.

El desarrollo del presente trabajo consta de varias etapas o capítulos que posteriormente se explicara con más detalle en el contenido de cada una.

Parte I. Antecedentes, de manera global en este capítulo se encuentra información sobre los diferentes procesos para la fabricación de hierro nodular, así como sus ventajas y desventajas que presenta cada uno de ellos y en forma conjunta el tipo de nodulizante que emplea cada proceso.

Parte II. Fundamentos, se establecen los fundamentos teóricos los cuales describen las teorías o hipótesis sobre la formación del grafito nodular en los hierros fundidos, además se presentan los efectos que producen los elementos de la aleación (composición química).

Parte III. Construcción del convertidor, la información de la parte I y II representa una parte sustancial para el diseño y construcción del convertidor de dos cámaras de tal forma que primeramente se presenta el diseño del convertidor de dos cámaras, desarrollando con este, una simulación de la reacción del nodulizante con el metal líquido, esto se efectúa con el objetivo de observar el comportamiento de dicha reacción, de proponer una velocidad y ángulo de giro del convertidor, de observar la cantidad de oxígeno que queda atrapado durante el giro y de la capacidad que debe de tener cada cámara, llegando a la conclusión de que el volumen de la primera cámara (cuando el convertidor se encuentra en posición vertical) tiene que ser igual al volumen de la segunda (cuando el convertidor se encuentra en posición del ángulo de giro).

Después de analizar estos parámetros se procede a la construcción del convertidor de dos cámaras teniendo como referencia de que la capacidad máxima debe de ser de 18 kilogramos de material fundido.

**Parte IV. Producción del hierro nodular,** se establece y de acuerdo a la simulación y diseño del convertidor que los 18 Kg. deben estar contenidos en la primera cámara y el agente nodulizante e inoculante en la segunda, de manera que al momento de realizar el giro del convertidor el metal líquido contenido en la primera cámara fluya a la segunda y se lleve a cabo la nodularización, además cuando se vierta el metal líquido a moldes se efectuara una post inoculación para asegurar la matriz. Antes de llevar a cabo la fusión y el tratamiento al metal líquido, se indica la composición química requerida del hierro nodular que se desea fabricar teniendo como referencia el rango de composición en la que se trabaja para este tipo de hierro, así mismo se hace hincapié de las materias primas, materias de ajuste, equipo, balances de carga y de la técnica de fusión empleada para el desarrollo del presente trabajo.

**Parte V. Resultados y discusión,** las piezas que se fabrican en este trabajo son de dos tipos: barras cilíndricas y bloques, las primeras se utilizan para poder efectuar un estudio metalográfico el cual lleva consigo la evaluación del hierro obtenido (tipo de matriz, tamaño del nódulo, porcentaje de nodularidad y densidad). La fabricación de los bloques tiene como objetivo primordial evaluar las propiedades mecánicas, pero en este trabajo no se contempla la evaluación de dichas propiedades debido a que el objetivo principal no engloba este aspecto

Una vez realizada la evaluación se procede a describir los resultados obtenidos. Los resultados descritos en este trabajo comprenden tres aspectos los cuales son: las cantidades empleadas de las materias primas, ferro aleaciones y agente nodulizante, que esto de manera conjunta sirve para poder efectuar los balances de carga y obtener la composición química final del hierro nodular, así mismo se enmarcan las temperaturas de trabajo y el tiempo de reacción del agente nodulizante para cada una de las fusiones que se realizan. La segunda parte de los resultados comprende las eficiencias del magnesio obtenidas para este nuevo proceso de nodularización sin considerar y considerando la reacción del magnesio con el azufre y la última parte de los resultados comprende únicamente la evaluación del hierro nodular fabricado, para ello se presentan fotografías de las micro estructuras obtenidas y de los patrones que se utilizan para dicha evaluación. La evaluación que se realiza comprende los siguientes aspectos:

- a) Tipo de matriz.
- b) Porcentaje de nodularidad.
- c) Tamaño del nódulo
- d) Cantidad de nódulos (densidad, expresada en nódulos / mm<sup>2</sup>)

Con los resultados que se presentan se desarrolla el análisis de resultados, el cual consta de la discusión de las ventajas y desventajas presentadas en la fabricación del hierro nodular con el convertidor de doble cámara, la importancia de la inoculación y post-inoculación, la discusión de las eficiencias obtenidas y de la evaluación de las micro estructuras.

**Parte VI y VII. Conclusiones y recomendaciones,** en todo trabajo experimental es importante tener las conclusiones que se presentan al desarrollar este tipo de trabajo, es por ello que en el trabajo efectuado además de presentar dichas conclusiones se proponen algunas ideas para lograr desarrollar una mejor calidad del hierro nodular con el convertidor de doble cámara, así como de desarrollar otro tipo de estudio en este convertidor.

## **CAPITULO I**

### **ANTECEDENTES.**

#### **1.1 PROCESOS DE NODULARIZACIÓN.**

Los procesos de nodularización vistos para este trabajo constan de cinco grupos principalmente, los cuales son:

**Grupo I:** esta conformado por los procesos que utilizan como medio de tratamiento de nodularización la olla, los cuales pueden dividirse en:

##### **a.- MÉTODOS DE OLLA ABIERTA.**

1. Sándwich.
2. Olla abierta.
3. Trigger.
4. Tapón poroso.

##### **b.- MÉTODOS DE OLLA CON CUBIERTA REMOVIBLE.**

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

##### **c.- MÉTODOS DE OLLA CON CUBIERTA FIJA.**

1. Método UPO.
2. Tetera.

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

##### **a.- NODULARIZANTE EN ESTADO SÓLIDO.**

1. Flow-trough.
2. Flo tret.
3. Alambre.

##### **b.- NODULARIZANTE A GRANEL.**

1. T-Nock.

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

##### **a.- IN MOLD.**

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

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

**a.- CONVERTIDORES.**

1. Convertidor Fisher.
2. Convertidor Fosco.

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

**a.- SISTEMAS A PRESIÓN.**

1. Cámara presurizada.
2. Inyección con lanza.

## **1.2 DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS**

### **1.2.1. ADICIÓN SIMPLE.<sup>(15)</sup>**

Este proceso consiste en colocar el agente nodulizante en el fondo de la olla sin cubierta protectora, lo cual trae por consecuencia que la recuperación del magnesio es baja, 20 a 30 %. La cantidad del nodularizante agregado era de 1 a 2 % en peso del metal a tratar.

#### **VENTAJAS.**

1. Este proceso no requiere instalaciones costosas.

#### **DESVENTAJAS.**

1. Se genera una gran cantidad de humos provocados por la oxidación del magnesio, MgO.
2. Es muy inseguro debido a que la reacción del magnesio con el metal es extremadamente violenta.
3. Es un proceso muy ineficiente, es decir, tiene una baja recuperación de magnesio residual.

### **1.2.2. MÉTODO SÁNDWICH.<sup>(16, 17)</sup>**

Se deriva a partir del método de adición simple. Dentro de la olla existe un pequeño desnivel en el cual se coloca el agente nodulizante que es recubierto con rebaba de acero y se compacta perfectamente para retrasar la reacción de oxidación del magnesio, la cubierta de acero no debe contener cantidades significativas de cromo, titanio, zirconio, vanadio y tungsteno ya que estos son contrarios al efecto buscado de grafitización, además de estos elementos también se deben evitar el plomo, estaño, antimonio y cadmio los cuales tienen un efecto perjudicial sobre la forma y tamaño final del grafito.

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

La olla presenta ciertas características como son la relación **altura : diámetro** que se encuentra desde 1.5 : 1 hasta 3 : 1, el desnivel donde se coloca el agente nodulizante debe tener un **ancho = diámetro/3** y la **altura = diámetro/6**, el diámetro es tomado en el fondo de la olla como se muestra en la siguiente figura.

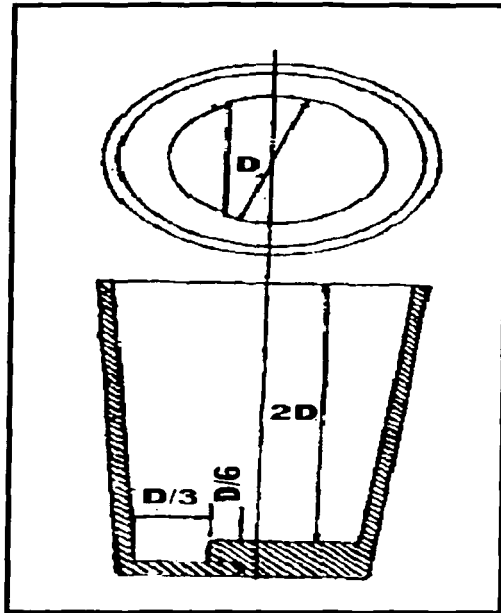


Figura 1. Representación de la olla utilizada en el método sándwich.

TESIS  
FALLA DE ORIGEN

#### VENTAJAS.

1. Bajo costos de inversión.
2. Flexibilidad.

### DESVENTAJAS.

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

### 1.2.3. MÉTODO TRIGGER.<sup>(16, 17)</sup>

Es parecido al método sándwich, con la diferencia que el nodulizante es recubierto con carburo de calcio, el cual inhibe efectivamente la reacción entre metal líquido y nodulizante hasta que la olla esta total o parcialmente llena. El tamaño de malla del nodulizante se incrementa al aumentar la cantidad de metal a tratar.

### VENTAJAS.

1. Menor cantidad de humos generados.
2. Menor cantidad de salpicaduras.
3. Mayor recuperación de magnesio debida a la presión metalostática sobre el nodulizante.

### DESVENTAJAS.

1. El carburo de calcio es más costoso que el acero.
2. El rendimiento esta alrededor del 50 % en la recuperación del magnesio

### 1.2.4. MÉTODO DE TAPÓN POROSO EN OLLA ABIERTA.<sup>(16, 17)</sup>

El nodulizante es transportado por un gas inerte dentro del baño líquido, también permite desulfurar previamente el metal con carburo de calcio por el mismo tapón poroso, el cual es permeable a los gases e impermeable al metal líquido cuando el gas no esta siendo inyectado.

### VENTAJAS.

1. Permite el tratamiento de nodularización inmediatamente después de desulfurar.
2. Se puede tratar metal líquido con alto contenido de azufre.

### DESVENTAJAS.

1. Alto costo y mantenimiento del equipo usado.
2. Pérdidas de temperatura al meter un gas a una menor temperatura.
3. El tamaño de la partícula y la velocidad de inyección del nodulizante es importante para obtener resultados óptimos.



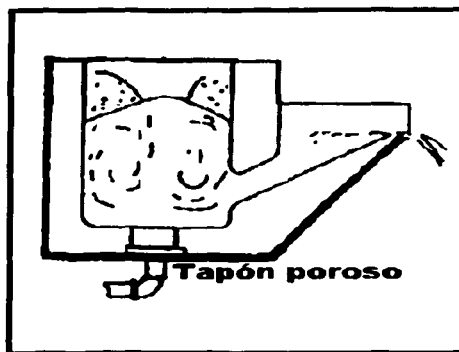


Figura 2 Representación del método de nodularización de tapón poroso.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 1.2.5. MÉTODO DE TUNDISH.<sup>(20,21)</sup>

Se emplea una olla como la de la figura 3, en esta olla el metal se vierte por el extremo opuesto al que se deposita el nodulizante de esta forma se retrasa aun más la reacción de nodularización. Se puede usar magnesio puro como nodulizante pero pueden presentarse problemas como son la formación de carburos y el incremento en la cantidad de contracción. La formación de carburos se puede evitar realizando una buena inoculación y si es fuera del molde o en el chorro de vaciado se utiliza ferro silicio al 75 % de silicio y un nivel de inoculación de 0.1% base silicio. La cantidad de inoculante a adicionar depende de:

1. Intervalo de tiempo entre la inoculación y el colado.
2. Tamaño y distribución del inoculante dentro del fundido.
3. Tamaño de la pieza a vaciar.

El incremento de contracciones es afectada por:

1. El carbón equivalente.
2. El magnesio residual efectivo.
3. La nucleación potencial.
4. La cantidad de elementos segregantes.

El rango de temperaturas de trabajo se encuentra entre 1454 y 1482 °C, una temperatura superior a 1482 °C reduce drásticamente la cantidad de magnesio recuperado. Algunos de los parámetros a controlar dentro del proceso Tundish son:

1. Nivel de silicio. La solubilidad del magnesio se incrementa con el aumento de silicio dentro del hierro.

2. Nivel de metal fundido arriba de las cámaras. Incrementando el nivel de hierro arriba de la cámara aumenta la recuperación del magnesio.
3. Limpieza de la olla. La escoria acumulada dentro de la olla reduce la cantidad de magnesio residual.
4. Nivel inicial de azufre. Si la cantidad inicial de azufre es alta, más magnesio es requerido.
5. Magnesio residual deseado. La cantidad de magnesio deseado dentro de la fundición depende de varios factores como son: tamaño de la pieza (tiempo de solidificación) y nivel final de azufre.

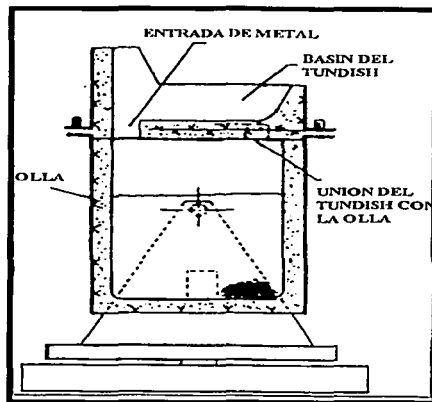


Figura 3. Representación esquemática del método Tundish

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

#### VENTAJAS.

1. Existe una cantidad menor de oxígeno dentro de la olla, por lo que habrá una menor pérdida de magnesio por oxidación.
2. El tratamiento en olla cubierta es un método más eficiente de aproximadamente 60 %.
3. Elimina las salpicaduras y destellos que se originan debido a la reacción del nodulizante.

#### DESVENTAJAS.

1. Mantenimiento a la olla debido a que se acumula escoria.
2. Control de temperatura de vaciado.
3. Adecuada inoculación.

#### 1.2.6. MÉTODO DE LA CAMPANA DE INMERSIÓN.<sup>(16, 22, 23)</sup>

Se utiliza una olla similar a la del método sándwich y en la cubierta de la olla se encuentra una campana como se muestra en la figura 4, la cual puede ser de grafito, de refractario o de placa de acero recubierta de refractario. Dentro de la campana es colocado el nodulizante y se cubre con una lámina delgada de acero o con una lechada de refractario con el fin de retrasar la reacción. El nodulizante puede ser granular o en forma de bloques aglutinados y tiene un alto contenido de magnesio (40 %).

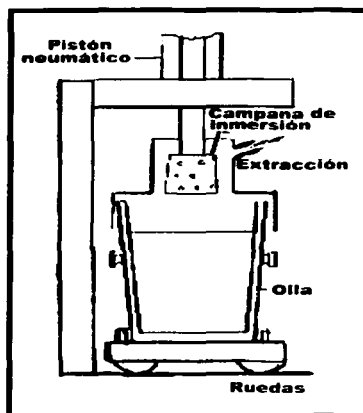


Figura 4. Esquema del método de nodularización empleando una campana de inmersión.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

#### VENTAJAS.

1. Se puede coleccionar los humos.
2. Se tiene mecanismos de autocontrol del desplazamiento del pistón.

#### DESVENTAJAS.

1. Pérdida de temperatura debido a la introducción de la campana dentro del metal líquido por lo que se tiene que llevar a cabo un precalentamiento de la campana antes de tener contacto con el metal líquido.

#### 1.2.7. MÉTODO POINT A MOUSSON (MAP).<sup>(16, 17)</sup>

Se emplea el equipo convencional de cualquier olla cubierta, el nodulizante es colocado dentro de una campana que se sumerge. Se utiliza como nodulizante magnesio puro en forma de lingote recubierto con una lechada de refractario de 2 a 3 mm de espesor y se deja una parte sin recubrir para que por ahí proceda la reacción. Se puede obtener una recuperación del magnesio del orden del 60 %.

**VENTAJAS.**

1. Bajo costo.
2. Mínima formación de escoria.
3. Simplicidad y flexibilidad.

**DESVENTAJAS.**

1. Las mismas que presenta el método de la campana de inmersión.

**1.2.8. MÉTODO UPO.** <sup>(16, 17, 23)</sup>

Tiene las mismas características del Tundish, solo que en este caso la cubierta se fija por medio de pernos y se coloca refractario moldeable entre la unión que además sirve como sello. La olla es de forma cuadrada recubierta con refractario de grafito y sílice, se coloca en un bastidor basculante el cual se monta sobre una celda de carga.

El orificio por donde entra el metal líquido tiene un diámetro de 100 mm pero se reduce a 38mm para eliminar emanaciones de humo. En la parte cubierta de refractario hay un orificio que se ubica en el lado opuesto al orificio de entrada del metal el cual permite la introducción del nodulizante por medio de un embudo. El nodulizante se recubre con ferrosilicio granular de composición Fe-50 %Si. El metal se vacía del horno de fusión a la olla a 1510 °C.

**VENTAJAS.**

1. Eliminación de humos, destellos y salpicaduras.
2. El cambio total del refractario se hace cada 1000 tratamientos.

**DESVENTAJAS.**

1. Control de la temperatura.

**1.2.9. MÉTODO DE LA TETERA.** <sup>(16, 19)</sup>

Es una combinación de los procesos con Tundish, la figura 5 muestra la olla empleada. La cubierta puede ser una placa sujeta a la olla por medio de mordazas y el nodulizante se introduce a través de un orificio en la cubierta el cual puede taparse con una pequeña placa. El metal entra y sale por aberturas laterales.

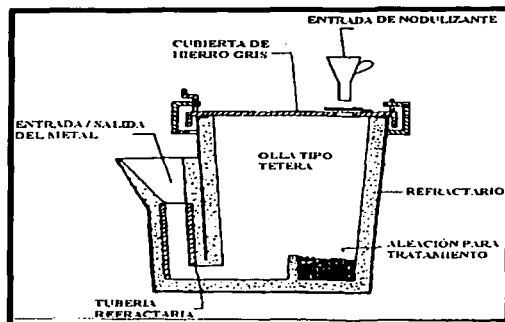


Figura 5. Esquema del método de la Tetera

#### VENTAJAS.

1. Buena recuperación de magnesio.
2. Eliminación de humos destellos y salpicaduras.

#### DESVENTAJAS.

1. Se debe transferir el metal que recibió el tratamiento a una olla de colada, debido a que el metal que quedó en el pico de la tetera no alcanza a tener el tratamiento.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 1.3. MÉTODO DE LA OLLA CERRADA.

#### 1.3.1. MÉTODO FLOW- THROUGH. <sup>(16, 21, 22)</sup>

Se emplea un canal horizontal revestido de refractario dentro del metal se encuentra la cámara de reacción donde va el nodulizante (figura 6). El tratamiento es semicontinuo y la recuperación del magnesio es buena y casi no se pierde temperatura.

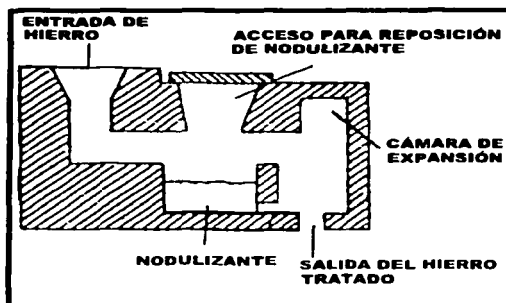


Figura 6. Esquema del método de nodularización Flow-Trough.

FALLA DE ORIGEN

#### 1.3.2. MÉTODO FLO TRET. <sup>(16, 17, 24, 33)</sup>

Este método fue presentado por primera vez en 1974 ante la Sociedad Americana de Fundidores.

Este método consiste en hacer pasar el metal líquido a través de una cámara de reacción a una velocidad controlada que esta directamente relacionada con el área de contacto con el nodulizante, figura 7. Se estableció que la aleación debería disolverse durante el 80 % del tiempo total de tratamiento.

#### VENTAJAS.

1. Eliminación de humos y destellos.
2. Buena recuperación de magnesio.

#### DESVENTAJAS.

1. Cuando el metal se enfría muy rápido en la olla de colada se tiene un diferente grado de nodularización.
2. La unidad requiere un cierto grado de auto limpieza que a la vez debe eliminar la formación de capas no homogéneas.

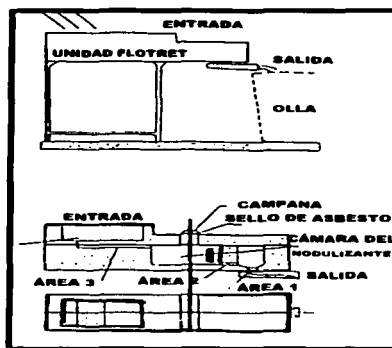


Figura 7. Esquema del método de nodularización Flo-Tret.

### 1.3.3. MÉTODO DEL ALAMBRE. <sup>(16, 25, 26)</sup>

Se basa en la introducción continua de una aleación de ferro magnesio en forma de alambre recubierto y puede ser usado cuando el material base tiene un alto contenido de azufre (0.03-0.10%) cuando se presenta esta situación el alambre es usado primero para desulfurar, después nodularizar y por último preinocular al hierro en el mismo proceso, si el material base tiene una cantidad menor del 0.03 % de azufre, el alambre es usado primeramente para nodularizar y posteriormente preinocular, este proceso se muestra en la figura 8.

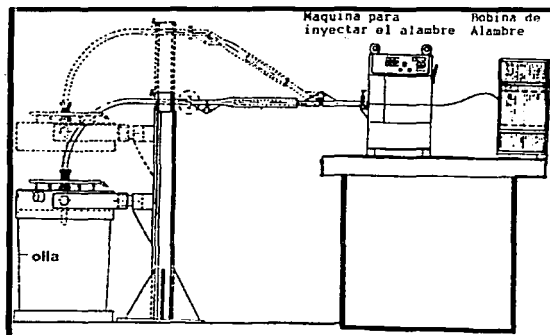


Figura 8. Representación esquemática del método del alambre.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

El núcleo del alambre tiene una composición típica de 25 % de magnesio, 20 % de calcio y 40 % de silicio, con un diámetro de 9, 13, 16 mm.

#### VENTAJAS

1. Baja pérdidas de temperatura y de magnesio, por lo que la recuperación de magnesio es reproducible.
2. Tiempos rápidos de tratamiento.
3. Capacidad para desulfurar, nodulizar y preinocular en la misma olla.
4. Eliminación de las incrustaciones de escoria formadas por el carburo de calcio, lo cual implica que el mantenimiento de la olla se reduzca.
5. Facilidad de automatización.

#### 1.3.4. MÉTODO T-NOCK.<sup>(16, 17, 22, 27)</sup>

Consiste en introducir el agente nodulizante en el chorro de vaciado entre el horno y la olla de colada por medio de un tubo refractario el cual entra en una cámara cerrada. En la cámara se puede introducir un gas inerte para evitar la oxidación del magnesio y así aumentar la eficiencia, figura 9.

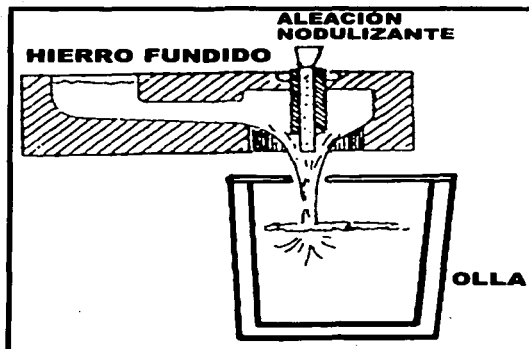


Figura 9. Esquema del método de nodularización T-Nock

#### VENTAJAS.

1. Alta recuperación del magnesio, 80 %.
2. Cantidades mínimas de humos y gases.
3. Posibilidad de automatizar.
4. Mínima pérdida de energía.

#### DESVENTAJAS.

1. Se requiere control de la dosificación del nodulizante.
2. Tamaño y tipo de nodulizante.

FALLA DE ORIGEN



#### 1.4. MÉTODOS IN-MOLD. (16, 28, 29, 34, 35, 36, 37)

En estos métodos se coloca un peso exacto de aleación de ferrosilicio-magnesio en una cámara especialmente diseñada con un sistema presurizado, figura 10. Este método ha resultado un efectivo método para producir fundiciones de hierro nodular de alta calidad. Dentro de los métodos IN MOLD podemos encontrar métodos con nodulizante granular, sólido o sinterizado.

El éxito en estos procesos es tener un adecuado diseño en la cámara de reacción y un buen sistema de colada tomando en cuenta:

1. Copa de llenado y bajada.
2. Cámara de reacción. La sección transversal del área de la cámara controla la cantidad de aleación expuesta al flujo de metal por unidad de tiempo. Las dimensiones de la cámara están determinadas por el factor de disolución y la velocidad de vaciado.

Área de la cámara = velocidad de vaciado / factor de disolución.

En la práctica se encontraron factores de disolución de 0.75- 0.85 dependiendo de la práctica de fundición y el espesor de la sección.

Velocidad de vaciado = peso del metal fundido / tiempo de vaciado en segundos.

El tiempo de vaciado se determina a partir de un estándar de AFS "Tabla de velocidad de vaciado", representado en un monograma.

3. Corredores. Lo más recomendable es tener sistemas presurizados y utilizar filtros y trampas para escoria.
4. Sistema de estrangulamiento. Controla la velocidad de llenado para la entrada a la pieza que será colada.

Área de estrangulamiento =  $(k * \text{peso a vaciar}) / (\text{tiempo de vaciado} * \text{EMH}^{0.5})$

La constante k toma valores de 0.31 a 0.34 para nodulizantes granulares.  $\text{EMH} = H (P^2 / 2C)$ , figura 11.

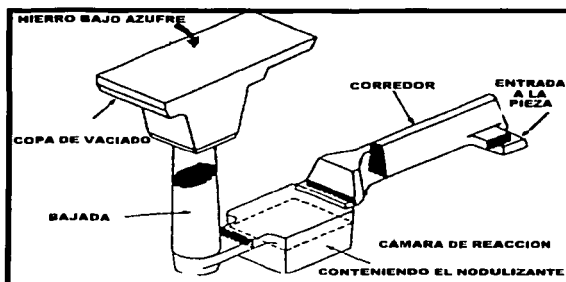


Figura 10. Esquema del sistema de alimentación para los procesos nodularización en el molde.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

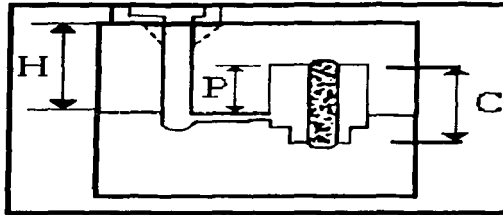


Figura 11. Esquema de alimentación para una pieza colada.

7220  
FALLA DE ORIGEN

Si se tiene el área de entrada a la pieza, se puede calcular el sistema de colada completo, por lo que se tiene:

- A = Área de estrangulamiento de la pieza.
- B = Área del corredor =  $A + 0.10 A$ .
- C = Área de la salida de la cámara de reacción =  $A + 0.12 A$ .
- D = Área de la entrada de la cámara de reacción =  $A + 0.30 A$ .
- E = Área de la bajada =  $A + 0.30 A$ , como mínimo.

Las variables más importantes a considerar en los métodos IN-MOLD son:

- a. La velocidad de disolución del nodulizante.
- b. Temperatura de colada del metal líquido.
- c. Velocidad de flujo del metal.
- d. Tamaño de partícula en el caso del nodulizante granular.

#### VENTAJAS.

1. Eliminación de humos. Son eliminados a través de la permeabilidad de la arena de moldeo.
2. Excelente recuperación de magnesio.
3. Pérdidas mínimas de temperatura.

## 1.5. MÉTODOS QUE UTILIZAN CONVERTIDORES.

### 1.5.1. CONVERTIDOR FISHER. <sup>(16, 30, 31)</sup>

Consta de un recipiente recubierto con refractario de alta alúmina que consta de tres secciones: la boca, el cuerpo y la cámara de reacción, la cual se localiza en el fondo del recipiente para mantener los lingotes de magnesio, figura 12. Se puede utilizar magnesio puro ya que el recipiente se cierra herméticamente, pero también se debe tener un equipo extractor de humos para cuando se abre el convertidor, la recuperación del magnesio es del orden de 60 a 70 %, la presión dentro del convertidor Fisher es de 34475 a 62055 N / m<sup>2</sup>.

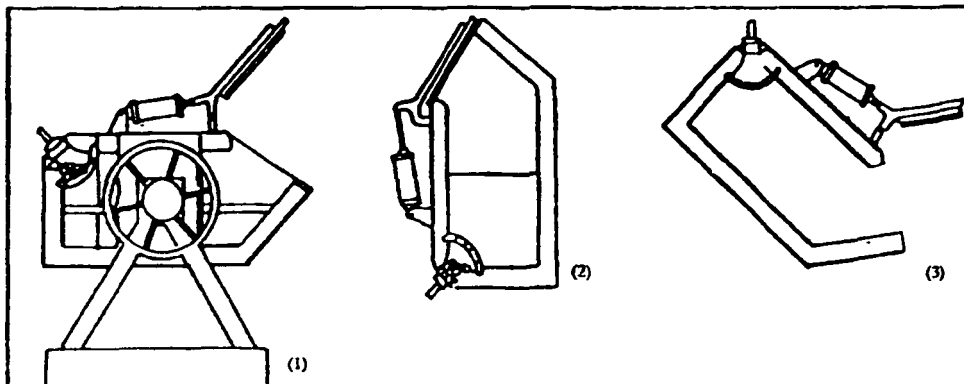


Figura 12. Representación esquemática de las posiciones del convertidor Fisher durante el tratamiento de nodularización. 1) el convertidor es cargado con metal líquido y aleación nodularizante en la recámara. 2) convertidor en posición vertical, se lleva a cabo la reacción de nodularización. 3) finalmente el metal tratado es descargado.

El factor limitante en la operación de un convertidor Fisher es la vida de la placa perforada que forma la cámara de reacción. Los pasos de operación son los siguientes:

1. El convertidor permanece en posición horizontal mientras se llena con el metal líquido, por lo que no existe contacto alguno entre el metal y la pared de la cámara de reacción.
2. Después de haber llenado el convertidor de metal y manteniendo la misma posición, la cámara de reacción es cargada con una cantidad adecuada de lingotes de magnesio, se asegura el tapón de la cámara, se cierra la tapa de la boca y se lleva a la posición de reacción en forma vertical.
3. Estando en forma vertical el metal fundido rodea la cámara de reacción y entra a través de los orificios de la placa, provocando la reacción del magnesio, el tiempo aproximado de tratamiento es de 60 a 70 segundos por tonelada de capacidad
4. Una vez terminada la nodulización el metal del convertidor se vacía a las ollas de colada y se realiza una inoculación

El hierro base debe cumplir con ciertas características como son:

- Y El contenido de azufre debe ser menor a 0.18 % de azufre para el uso de magnesio puro.
- Y Contenido de carbón. Las pérdidas de carbono que se llevan a cabo en el proceso Fischer son bajas.

#### VENTAJAS:

1. Facilidad de operación.
2. Confiabilidad de resultados.
3. Pueden tratarse volúmenes grandes de metal, el cual puede tener un alto contenido de azufre.

#### DESVENTAJAS:

1. Elevado costo inicial.
2. Pago de regalías por patente.

#### 1.5.2. CONVERTIDOR FOSECO.

A diferencia del convertidor Fisher la cámara de reacción esta separada del cuerpo del convertidor.

La unidad es un diseño creado por FOSECO, figura 13, para el uso de coque impregnado con magnesio ( Mag-Coke ) con el objetivo de disminuir costos en la inversión inicial en equipo más complejo así como para recibir hierro de un horno de cubilote o de un horno de inducción. Se puede tratar hierro hasta con un 0.15 % de azufre.

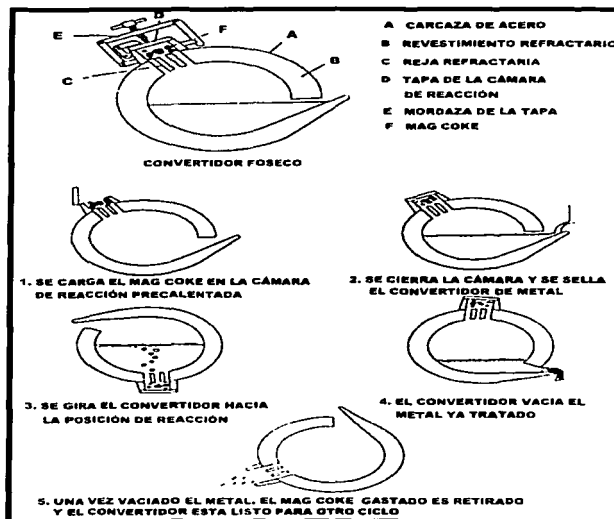


Figura 13. Esquema del Convertidor Foseco.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## CAPITULO II.

### FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

Las fundiciones férreas se diferencian de los aceros por su composición química (contenido de carbono igual o mayor al 2%) y por sus propiedades tecnológicas en donde su estructura exhibe una gran cantidad de fases compuestas por carbono. Dependiendo del potencial de nucleación (que depende del tipo de tratamiento que se le efectúe al metal líquido), composición química y velocidad de enfriamiento la solidificación de las fundiciones férreas depende de acuerdo a la termodinámica, puede seguir dos tipos de sistemas, el sistema meta estable en el cual la solidificación sigue un comportamiento del diagrama de fases Fe-Fe<sub>3</sub>C y el sistema estable en el cual la solidificación sigue un comportamiento del diagrama de fases Fe-Cg.

El potencial de nucleación del líquido y la composición química determinan el potencial de grafitización del hierro. Un alto potencial de grafitización trae como resultado que el grafito contenido dentro del hierro sea rico en fases de carbono y por el contrario conlleva a que se generen carburos en el hierro.

### 3.1 CLASIFICACIÓN DE LAS FUNDICIONES FÉRREAS.

Históricamente la primera clasificación para fundiciones férreas fue hecha a través de la fractura del material, por lo que solamente son reconocidos dos tipos de hierro:

1. Hierro blanco: La superficie de la fractura es blanca y cristalina y es el resultado de seguir una solidificación del sistema meta estable (Fe-Fe<sub>3</sub>C).
2. Hierro gris: La superficie de la fractura es gris y es el resultado de seguir una solidificación del sistema estable (Fe-Cg).

Con la llegada de la metalografía y con el aumento en los conocimientos de las fundiciones, se encuentra otro tipo de clasificación basada en la microestructura y morfología del grafito. La forma del grafito se clasifica como: grafito laminar u hojuela (FG), grafito esferoidal (SG), grafito compactado o vermicular (CG) y grafito maleabilizado (TG), figura 14.

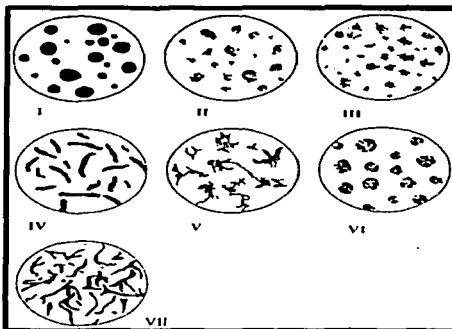


Figura 14. Morfología del grafito empleadas para clasificar a los hierros fundidos (ASTM).

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

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

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

### 3.2 DEFINICIÓN Y TRATAMIENTOS PARA LA OBTENCIÓN DEL HIERRO NODULAR.

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

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

1. Carbono combinado: El cual se encuentra depositado dentro de la cementita ( $Fe_3C$ ).
2. Carbono libre: Esta depositado o precipitado en forma de esferoides.

Para la obtención del hierro nodular se tiene que llevar a cabo tres tratamientos al metal líquido que consta de una inoculación, nodularización y post inoculación.

#### 3.2.1 INOCULACIÓN Y POST INOCULACIÓN.

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

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

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

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

#### 3.2.2 NODULARIZACIÓN.

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

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

### 3.3. INFLUENCIA DE LOS ELEMENTOS DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA EN EL HIERRO NODULAR.

Muchos de los elementos presentes en el hierro nodular han sido clasificados por tener influencia sobre la microestructura, estos son:

1. Elementos primarios: carbono, silicio, manganeso, azufre y fósforo.
2. Elementos de aleación: cobre, níquel y molibdeno.
3. Elementos promotores de carburos y perlita: astato, boro, cromo, estaño y vanadio.
4. Elementos con propósitos especiales y residuales: aluminio, bismuto, plomo, antimonio, etc.
5. Gases: hidrógeno, nitrógeno y oxígeno.

Es necesario enfatizar que el control de la composición química es fundamental para obtener un grafito esferoidal junto con una microestructura de matriz deseada.

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

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

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

**Silicio.** Incrementa la elongación, la resistencia al impacto, la dureza y la resistencia a la fatiga. Se considera como un agente grafitizador y promueve la formación de estructuras ferrítica, además disminuye el tamaño de las celdas eutécticas y como resultado se obtiene una disminución de formación de carburos el cual dependerá del tiempo de residencia y de una efectiva inoculación. Junto con el carbono determina el carbono equivalente así como las formas o estructuras del grafito, figura 15.

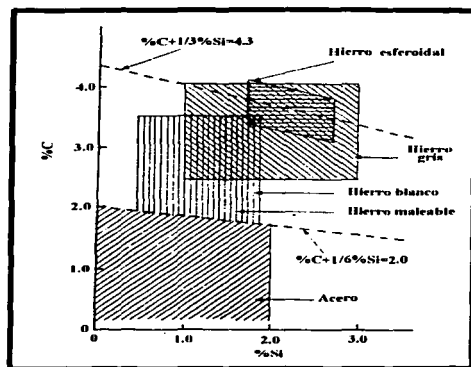


Figura 15. Efecto combinado del silicio y carbono.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

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

**Azufre.** El porcentaje de azufre dentro del metal no debe de exceder al 0.02% ya que de otra manera se tendrá un gasto excesivo de magnesio.

Es el principal elemento que se debe de tomar en cuenta para que se lleve a cabo la nodularización ya que este reacciona con el magnesio para formar el sulfuro de magnesio (MgS), el cual es antigrafitizante.

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

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

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

1. Cuando el magnesio es agregado al metal líquido, actúa como desoxidante y desulfurante del metal en combinación con el oxígeno y azufre que se encuentran en solución, el resultado de la desoxidación y desulfuración es la producción de óxido de magnesio y sulfuro de magnesio, los cuales presentan baja solubilidad en el metal y baja densidad.
2. El magnesio es altamente volátil (comparado con la temperatura del tratamiento), su punto de ebullición es de 1170 °C, por lo que el contenido de magnesio disminuye con el aumento de la temperatura.
3. También es un excelente modificador de la forma del grafito (magnesio residual), conforme aumenta la cantidad de magnesio en el metal líquido la estructura o forma del grafito sufre cambios pasando primero desde grafito en forma de hojuela a forma vermicular y finalmente a forma esferoidal. Este cambio que se presenta en la forma del grafito como función del magnesio residual se puede observar en la figura 16, si se tiene cantidades menores a 0.01 % el grafito es de forma de hojuelas, en el caso de que el magnesio residual se encuentre entre



0.01 y 0.03% la forma del grafito es vermicular, más allá de un 0.035% de magnesio residual se encuentra el grafito en forma de esferoides.

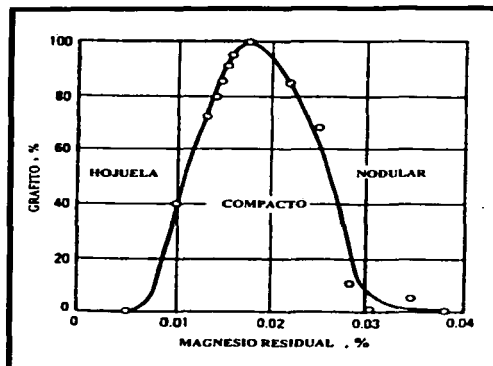


Figura 16. Influencia del contenido de magnesio residual en la forma del grafito y su porcentaje presente.

TIPO DE  
FALLA DE ORIGEN

**Níquel.** Es adicionado con la finalidad de aumentar la dureza, promueve la formación de una perlita más fina, además incrementa la templabilidad especialmente cuando se realiza tratamientos térmicos de austempering.

**Cobre.** Es un agente grafitizante y promotor de la perlita.

**Molibdeno.** Es usado para incrementar la templabilidad en secciones pesadas en donde se realiza tratamientos térmicos de austempering.

**Titanio.** Se considera como un agente antiesferoidizante y promueve la formación del grafito en forma vermicular.

**Telurio.** Promueve la formación de carburos, la combinación con el magnesio es similar al azufre formando el telurio de magnesio.

**Plomo.** En pequeñas cantidades afecta la estructura del grafito esferoidal.

**Aluminio.** Promueve la formación del grafito vermicular.

**Cromo.** Es un formador de carburos y promotor de la perlita (el vanadio presenta el mismo efecto).

### 3.4 TEORIAS SOBRE LA FORMACIÓN DEL GRAFITO NODULAR.

Existen varias teorías sobre la formación del grafito nodular, ninguna de ellas ha sido posible explicar todos los cambios que se presentan en la formación del mismo, por ende a continuación se describen las diferentes teorías que se han desarrollado a través del tiempo.

#### 3.4.1 TEORÍA DEL CRECIMIENTO A PARTIR DE UN NÚCLEO PARTICULAR.

De acuerdo a De Sy y Vidts, el crecimiento de grafito esferoidal puede darse sobre un núcleo particular con estructura cristalográfica definida. Esto es que inclusiones que tienen una estructura cúbica como son  $MgS$ ,  $MgO$  y  $Mg_2Si$  promueven la formación de grafito esferoidal.

Inclusiones con estructura hexagonal como son  $SiO_2$ ,  $SiC$  y  $SiO$  promueven la solidificación de grafito laminar. La presencia de grafito esferoidal en fusiones al vacío de aleaciones de Fe-C-Si sin tratamiento con magnesio o cerio puede atribuirse a la ausencia de  $SiO_2$  en el metal fundido y esto puede soportar el argumento de esta teoría. La debilidad de esta teoría consiste en que no hay evidencia teórica o experimental que pueda relacionar el crecimiento del cristal a partir del núcleo en las últimas etapas del proceso de cristalización.

#### 3.4.2 TEORÍA DE LA ENERGÍA SUPERFICIAL.

Esta teoría se basa en la observación de que la energía superficial entre el grafito y el líquido es más alta en hierro nodular que en el hierro gris. Se ha encontrado una energía superficial de 800-1100 dinas / cm para el grafito laminar y de 1400 dinas / cm para el grafito esferoidal, figura 17.

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

En presencia de ciertos activadores de la superficie (tenso activos) el grafito tiende a crecer más rápidamente en la dirección perpendicular al plano basal y esta dirección de crecimiento se obtiene al eliminar oxígeno y azufre.

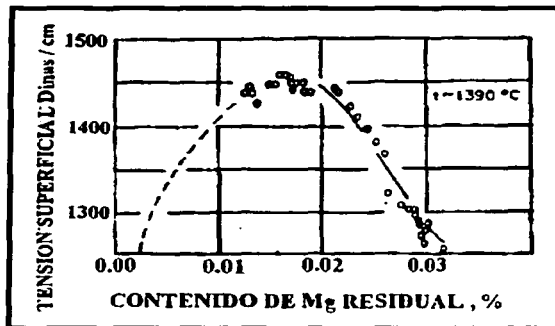


Figura 17. Influencia del contenido de magnesio residual sobre la tensión superficial

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 3.4.3 TEORÍA DEL CRECIMIENTO DENTRO DE BURBUJAS DE GAS.

Las burbujas de gas resultantes de la alta presión de vapor de elementos como el magnesio o burbujas de gases de nitrógeno e hidrógeno son sitios posibles para el crecimiento de grafito esferoideal, figura 18. Yamamoto ha demostrado experimentalmente que las tierras raras no producen esferoidización en metal desgasificado, mientras que en tierras raras saturadas con hidrógeno o simplemente burbujeando hidrógeno o nitrógeno a través del metal fundido produce esferoides de grafito. Por otro lado, Karsay propone el siguiente mecanismo en el cual el gas responsable de la formación de esferoides es el CO, los pasos de dicho mecanismo son:

1. A temperaturas aproximadas a la temperatura de solidificación la mayor parte del oxígeno disuelto en el hierro precipita como inclusiones microscópicas de SiO<sub>2</sub>.
2. Algunas de estas inclusiones reaccionan con carbono de acuerdo a la reacción:  

$$\text{SiO}_2 + 2\text{C} = \text{Si} + 2\text{CO}$$
3. El grafito nuclea dentro de la superficie de las burbujas de gas de CO.
4. El crecimiento individual de cristales a lo largo de la dirección [0001] eje C es opuesto a la dirección del crecimiento para el grafito laminar que es [1010] eje A.
5. El crecimiento continúa hasta que la burbuja esta completamente llena.

Básicamente esta teoría sugiere que el esferoide de grafito crece dentro de las burbujas de gas. Si las burbujas colapsan, el resultado es grafito laminar, si no colapsan el grafito es esferoideal.

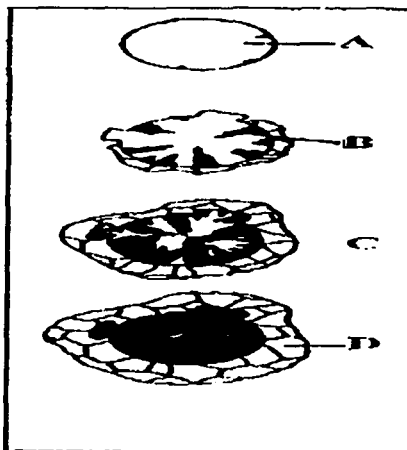


Figura 18. Grafito creciendo dentro de una burbuja de gas. A) gas. B) cristal de grafito. C) hierro líquido y D) hierro sólido.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 3.4.4 TEORÍA DEL CRECIMIENTO A TRAVÉS DE LA CAPA DE AUSTENITA.

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

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

El crecimiento posterior del grafito ocurre por la difusión del carbono a través de la capa de austenita, figura 19. La cantidad de nódulos formados esta en función de la cantidad de cristales de austenita primaria saturada. Una vez precipitado el grafito el crecimiento del nódulo se controla por difusión. Por último, dado que el crecimiento del grafito en el interior del hierro sólido requerirá una energía considerable para deformar plásticamente a la austenita, el crecimiento del carbono grafito dentro del hierro sólido es limitado.

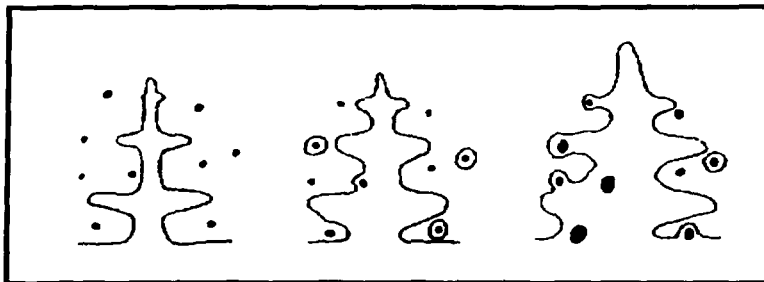


Figura 19. representación del crecimiento del grafito en el seno del líquido y dentro de la austenita.

La formación de una capa de austenita alrededor del grafito nodular tiene un efecto sobre el deterioro de la forma del grafito, figura 20. Cuando la austenita nuclea y crece alrededor del grafito, ésta sufre rupturas y refusiones formándose pequeños canales de líquido por donde los átomos de carbono pueden difundir en una dirección dando como resultado un deterioro en la forma del grafito. Esto muestra que un rápido envolvimiento de la capa de austenita produce formas nodulares perfectas, en cambio cuando la austenita envuelve lentamente al carbono o no lo envuelve se tiene formas de grafito deteriorado.

TECNOLOGÍA  
FALLA DE ORIGEN

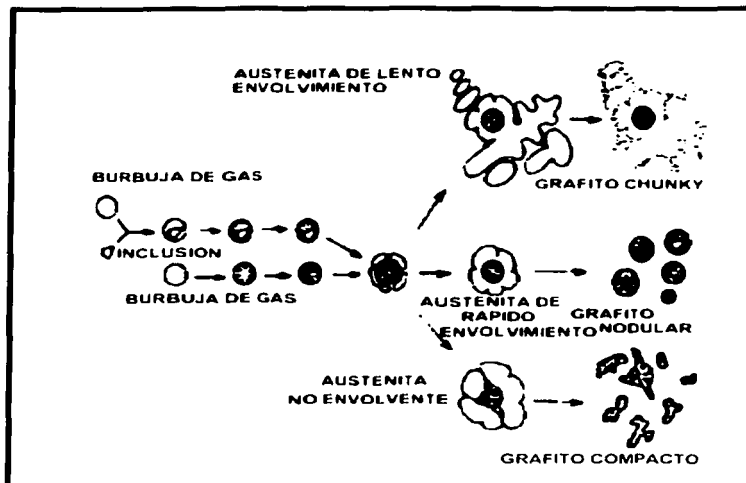


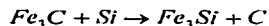
Figura 20. Efecto de la envoltura de austenita sobre la forma final de grafito.

La razón de por que la capa de austenita envuelve rápidamente o lentamente al grafito, depende de la velocidad de enfriamiento de la fundición. Un rápido enfriamiento acelera la nucleación y crecimiento de austenita y esta tiende a formar una rápida envoltura alrededor del carbono nucleado.

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

### 3.4.5 TEORÍA DEL CRECIMIENTO EN ESTADO SÓLIDO.

En una aleación Fe-C-Si, el silicio juega un papel importante, ya que cuando se encuentra presente en una concentración de 0.6% a 3.5% forma el siliciuro de hierro, puesto que el silicio disminuye la solubilidad del carbono en el hierro desplazando así al carbono y provocando que este precipite como grafito, la reacción de descomposición es:

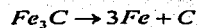


También se conoce que los carburos son muy inestables bajo ciertas condiciones, las cuales son:

1. Un elevado porcentaje de silicio y una lenta velocidad de enfriamiento desplaza al equilibrio de la reacción anterior hacia la derecha.
2. Presencia de cristales (núcleos) formados en la fase líquida.

3. Bajo contenido de manganeso, azufre y cromo, ya que dichos elementos son fuertes formadores de carburos.
4. Temperatura de fusión y colada.
5. Tiempo de retención durante y después del tratamiento de nodularización (tiempo de residencia).

El grafito puede precipitar directamente de la fase fundida o como producto de la descomposición de la cementita según la reacción:



Posterioros trabajos experimentales llevan a la conclusión de que la descomposición de la cementita no es necesaria para la precipitación del grafito en forma de nódulo, ya que este cristaliza directamente desde la solidificación.

## CAPITULO III.

### DISEÑO DEL CONVERTIDOR.

#### 3.1 MODELO FÍSICO.

Para el diseño y construcción del convertidor de dos cámaras se parte de un modelo físico en el cual se realiza la simulación del tratamiento de nodularización y para obtener las dimensiones del convertidor.

##### 3.1.1 DISEÑO DEL MODELO FÍSICO.

Para el diseño del modelo físico se toman en cuenta las siguientes consideraciones:

- ✓ Se simula al metal líquido con agua y como nodulizante se utiliza una pastilla efervescente.
- ✓ El volumen de metal líquido en la primera cámara (posición vertical del convertidor) debe ser igual al volumen de metal líquido de la segunda cámara (posición de giro del convertidor).
- ✓ La tapa del convertidor debe presentar un orificio por donde se agrega el nodulizante e inoculante, además de que tendrá como función la salida del metal líquido.
- ✓ Para la construcción del modelo físico se utiliza un cilindro de acrílico de 12 cm de altura con un diámetro interno de 9.355 cm, además se emplea una placa del mismo material con 11 cm de altura, ancho de aproximadamente de 9.28 cm y espesor de 0.2 cm, cuya función es dividir al cilindro de acrílico en dos partes (cámaras).
- ✓ La tapa superior e inferior son de acrílico con diámetro de 9.8 cm y espesor de 0.4 cm. La tapa superior no es completamente circular, presenta un corte en forma de media luna y a la altura de la segunda cámara del cilindro presenta un orificio que es por donde se realiza la simulación de la salida del metal líquido (agua) y por donde se agrega el nodulizante (pastilla efervescente).

El principal objetivo de esta simulación es observar el comportamiento de la reacción del nodulizante con el metal líquido y en consecuencia llevar a cabo la construcción del convertidor alterando algunas variables como son:

1. Velocidad de giro del convertidor
2. Ángulo de giro.
3. Cantidad de aire atrapado dentro de la cámara de reacción.
4. Comportamiento del nodulizante (pastilla efervescente) con el metal líquido (agua) dentro del convertidor (la densidad del Fe-Si-5%Mg es menor a la densidad del hierro y la densidad de la pastilla efervescente es menor que la densidad del agua).

El desarrollo de esta simulación consta de los siguientes pasos, ( figura 21 ):

- a) Se vierte la pastilla efervescente en gránulos a la segunda cámara a través del orificio de la tapa.
- b) Se agrega el agua a la primera cámara procurando que no se desborde a la segunda cámara.
- c) Posteriormente se gira el cilindro de acrílico a varios ángulos de inclinación hasta establecer el ángulo de giro óptimo para el atrapamiento del efervescente.
- d) Por último, se lleva a cabo la reacción y se observa el comportamiento de dicha reacción y después de concluir la reacción se vacía el agua por el orificio de la tapa.

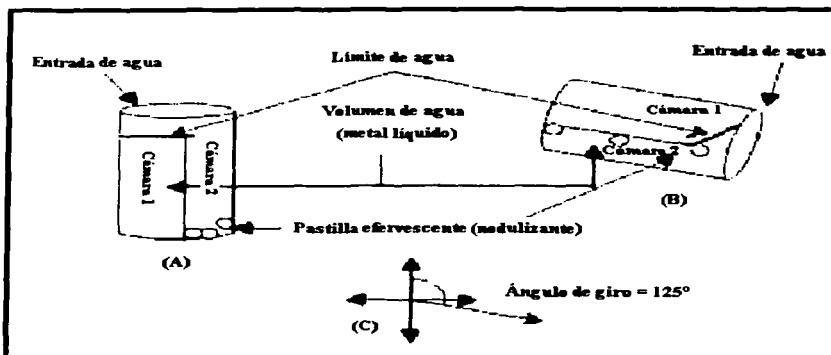


Fig. 21. Representación de la simulación, (A) se agrega agua a una de las cámaras y en la otra se deposita la pastilla efervescente. (B) se realiza el giro para que se lleve a cabo la simulación de la reacción, (C) representa el ángulo de giro del modelo al cual se llega.

En base al modelo físico se procede para la construcción y diseño del convertidor de doble cámara.

### 3.1.2. DISEÑO DEL CONVERTIDOR.

Se parte de que la capacidad de cada una de las cámaras debe ser de 18 Kg., por lo que primero se procede a calcular el volumen requerido para cada cámara, partiendo de las siguientes consideraciones:

- Densidad del hierro =  $7.2 \text{ g / cm}^3$ .
- Masa requerida = 18000 gr.
- Volumen requerido = masa requerida / densidad del hierro.

$$V_{\text{requerido}} = \frac{18000 \text{ g}}{7.2 \text{ g / cm}^3} = 2500 \text{ cm}^3$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

#### 3.1.2.1. DIMENSIONES DEL CONVERTIDOR.

Con lo que respecta a la carcaza del convertidor (cilindro), sus dimensiones son:

- Altura sin refractario = 43 cm.
- Altura con refractario = 38 cm.
- Diámetro interno sin refractario = 28 cm
- Diámetro interno con refractario = 20 cm.
- Diámetro externo = 28.6 cm.



Una vez que se cuenta con las dimensiones del convertidor, se obtienen las dimensiones de las placas que dividen al convertidor en dos cámaras:

- Y Altura = 32 cm.
- Y Ancho = 28 y 27.8 cm.

Y por consecuencia se calcula el diámetro de las tapas del convertidor:

- Y Diámetro de tapa inferior = 32.6 cm.
- Y Diámetro de tapa superior = 32.6 cm (lleva un corte de media luna de 10 cm).

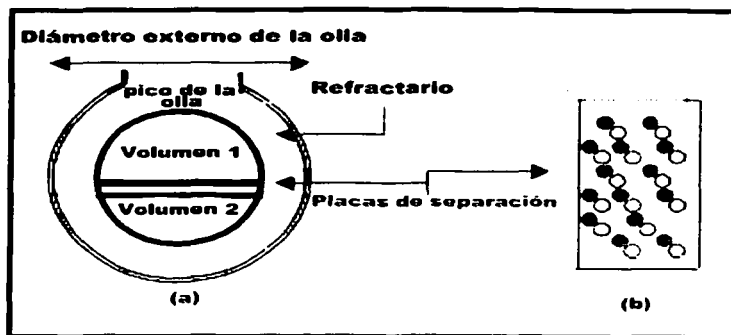


Figura 22. (a) Representación del convertidor con vista superior. (b) láminas de separación con orificios.

### 3.1.2.2. MATERIAL Y EQUIPO PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL CONVERTIDOR.

El material para la construcción básica del convertidor es:

- Lámina de acero de 0.6 cm de espesor.
- Refractario base sílice (ácido).
- Aislante en forma de fibra.
- Barras cilíndricas de acero.
- Solera de 2.5 pulgadas de ancho.
- Tornillos de alta resistencia de 2.5 pulgadas de largo.
- Barras cuadradas de 2 por 2 pulgadas.
- Soldadura.

El equipo para la construcción del convertidor es:

- Soplete de gas acetileno.
- Máquina para soldar de corriente alterna.
- Esmeril.
- Taladro.
- Torno.
- Sierra alterna.
- Arco.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 3.1.2.3 ACCESORIOS.

Por otra parte el convertidor consta de varios accesorios, los cuales son:

- ✓ Maneral. Consta de una barra de 1.5 pulgadas de diámetro, el cual va fijo al convertidor.
- ✓ Discos huecos. Van en cada extremo del convertidor por dentro del maneral.
- ✓ Soporte del convertidor. Consta de canales de acero que se unen en forma de "U" en el cual las extremidades van unidas a los discos huecos. Su principal función es cargar el convertidor con la ayuda de la grúa
- ✓ Prensas para sellar las tapas. Son barras cuadradas de 1.5 pulgadas de diámetro en forma de ele en el extremo más corto se perfora con una broca para posteriormente realizar los barrenos o cuerdas en el cual entraran tornillos de alta resistencia que servirán para apretar las tapas.
- ✓ Tapa chica. Su principal aporte es sellar por donde se vacía el metal líquido del convertidor hacia los moldes, de manera de que se pueda efectuar el giro del convertidor y se lleve a cabo la reacción.
- ✓ Aislante. Tiene como función sellar la tapa superior del convertidor y la tapa chica para evitar alguna fuga del metal líquido, además de conservar un poco más la temperatura dentro del convertidor.

### 3.1.2.4. CONSTRUCCIÓN DEL CONVERTIDOR.

A una placa de 43 cm de altura y 0.6 cm de espesor se le calcula el perímetro utilizando para este calculo el diámetro interno del convertidor a construir:

Diámetro interno requerido del convertidor = 28 cm

Perímetro =  $\pi * D = 3.1416 * 28 \text{ cm} = 87.96 \text{ cm}$ .

Por lo tanto el largo de la lámina es de 87.96 cm, posteriormente se rola y después se suelda. A las placas que separan al convertidor en dos secciones (cámaras) se le hacen unos orificios con la ayuda de un soplete de gas acetileno y oxígeno, con la finalidad de que cuando se aplique el refractario, este no se desprenda tan fácilmente durante o después de cada fusión.

Con respecto a la tapa superior, a ésta se une una solera en toda su circunferencia y se le realiza un corte en forma de media luna la cual va de extremo a extremo del pico del convertidor y es por donde se recibe el metal líquido, además presenta un orificio con un diámetro de 15 cm que se encuentra a la altura de la segunda cámara, cuya función principal (como se hace constatar en el modelo físico) es para el vaciado del metal líquido a moldes, además es por donde se introduce el nodulizante e inoculante, este orificio se sella con una tapa de 20 cm diámetro y de 5 centímetros de altura.

Por último se construye el pico del convertidor el cual es de forma cuadrada.

### 3.1.2.4.1 SECUENCIA DE CONSTRUCCIÓN DEL CONVERTIDOR.

La secuencia de armado del convertidor es el siguiente:

- 1.- Se une la tapa inferior con lo que es el cilindro o la lámina rodada.
- 2.- Posteriormente se colocan las placas dentro del convertidor y se sueldan a una distancia de separación de 1.5 cm una de la otra.
- 3.- Se coloca el pico, el cual es de forma cuadrada.
- 4.- Se diseñan las preformas de unisel con la forma que tienen las cámaras de acuerdo al diseño.
- 5.- Se prepara el refractario (base sílice) con un aglutinante y agua, la relación de la mezcla debe ser de 3 a 1 respectivamente y se coloca en el convertidor alrededor de las preformas de unisel.
- 6.- A la tapa superior del convertidor se le coloca el mismo tipo de refractario.
- 7.- La tapa que sirve para sellar el orificio de la tapa superior, se le coloca un refractario de alta alúmina.
- 8.- Por último se colocan los accesorios los cuales son: maneral, llaves para sellar las tapas, enganche para utilizar la grúa.

La siguiente figura muestra al convertidor de doble cámara.

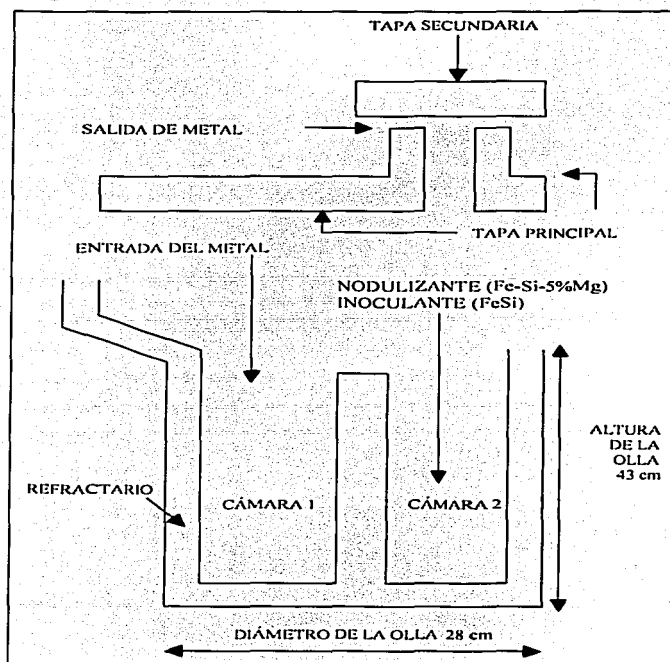


Figura 23. Representación esquemática del convertidor de doble cámara, simulando un corte longitudinal

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## CAPITULO IV.

### PRODUCCIÓN DEL HIERRO NODULAR CON EL CONVERTIDOR DE DOBLE CÁMARA.

En la fabricación del hierro nodular es necesario tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- ✓ Composición química del hierro nodular a fabricar
- ✓ Equipo.
- ✓ Precalentamiento del convertidor de doble cámara.
- ✓ Materias primas (chatarra) y ferro aleaciones.
- ✓ Balances de carga.
- ✓ Técnica de fusión.
- ✓ Moldes.

#### 4.1 COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL HIERRO NODULAR A FABRICAR.

La composición química del hierro nodular a fabricar, debe de estar dentro de los siguientes rangos de composición:

% C	% Si	% Mn	% S	% P
3.0 - 3.9	1.8 - 2.8	0.15-0.9	0.03 máx.	0.10 máx.

Para este trabajo se selecciona la siguiente composición química, sobre la cual se trabaja:

% C	% Si	% Mn	% S	% P
3.6	2.45	0.6	0.015 máx.	0.05 máx.

#### 4.2 EQUIPO.

El equipo utilizado para llevar a cabo la fabricación y evaluación del hierro nodular consta de:

- ✓ Horno de inducción sin núcleo. Es donde se lleva a cabo la fusión.
- ✓ Espectrómetro de emisión de chispa. Su función es determinar la composición química por elemento del hierro nodular a fabricar.
- ✓ Convertidor de doble cámara. Para el tratamiento del metal líquido (nodularización).
- ✓ Pirómetro de inmersión y registrador de temperaturas. Registra la temperatura del metal líquido durante la fusión.
- ✓ Molde permanente para el análisis de las muestras. La muestra tiene forma de moneda y es a la que posteriormente se le efectúa el análisis químico por medio del espectrómetro de emisión.
- ✓ Cucharas para toma de muestras. Son de hierro gris y recubiertas con pintura refractaria, se utilizan para tomar la muestra del metal líquido del horno de inducción para después vaciar al molde permanente.
- ✓ Microscopio metalográfico.
- ✓ Analizador de imágenes.

#### 4.2.1 HORNO

En el caso del hierro nodular se debe tener presente un buen control de la temperatura y la composición del metal. Con lo que respecta a la temperatura, esta debe ser lo suficientemente alta para evitar problemas en el tratamiento, pero no tan altas donde las pérdidas de magnesio son elevadas, debido a su punto de ebullición.

El horno empleado durante este trabajo para la fabricación del hierro nodular es un horno de inducción sin núcleo de 75 Kw., este tipo de horno funciona con una subestación eléctrica además de contar con un sistema interno de enfriamiento de agua. La capacidad del horno es de 100 kilogramos aunque no se recomienda trabajar a su máxima capacidad debido a que se puede originar algún tipo de accidente que involucre la integridad física de las personas.

#### 4.2.2 ESPECTROMETRO DE EMISIÓN.

La función primordial del espectrómetro de emisión es obtener un análisis preliminar por elemento del metal, la muestra que se obtiene tiene forma de moneda, esto se efectúa con el objetivo de asegurar que el metal líquido se encuentre dentro de la composición requerida por elemento. El tipo de espectrómetro empleado es un espectrómetro de emisión marca espectrolab M8B.

#### 4.2.3 CONVERTIDOR DE DOBLE CÁMARA.

Se utiliza principalmente para llevar a cabo el tratamiento del metal líquido (nodularización), de igual forma se realiza dentro de éste la inoculación.

#### 4.2.4 REGISTRADOR DE TEMPERATURA.

Es de vital importancia durante las fusiones, ya que registra la temperatura del metal líquido dentro del horno de inducción e indica el momento en que se ha alcanzado la temperatura de colada.

#### 4.2.5 MOLDE PERMANENTE PARA EL ANÁLISIS PRELIMINAR.

Tiene forma de moneda, antes de la colada se toma una muestra de metal líquido del horno de inducción y se vierte sobre el molde permanente, de tal forma que después de unos 10 segundos de realizar lo anterior, se retira la muestra sólida del molde y se enfría para prepararla para el análisis preliminar por medio del espectrómetro de emisión.

#### 4.2.6 MICROSCOPIO METALGRÁFICO.

Se utiliza para la evaluación metalográfica del hierro obtenido, como es: tamaño de nódulo, % de nodularidad, densidad de nódulos y tipo de matriz

#### 4.2.7 ANALIZADOR DE IMÁGENES.

La función del analizador es adquirir y proporcionar las características de las micro estructuras de los hierros obtenidos, es decir, en lugar de tomar fotos las imágenes se guardan en la computadora y posteriormente son impresas.

### 4.3 PRECALENTAMIENTO DEL CONVERTIDOR DE DOBLE CÁMARA.

El precalentamiento que se realiza es con la finalidad de que el metal líquido contenido en el convertidor no solidifique. El precalentamiento se realiza con un quemador de gas y éste comienza desde el momento en que se enciende el horno de inducción, de tal forma que el precalentamiento se lleva a cabo para cada cámara del convertidor. El procedimiento empleado consiste en colocar el quemador en cualquiera de las dos cámaras durante un tiempo aproximado de 20 minutos, al término de este tiempo el quemador pasa a precalentar la otra cámara durante el mismo tiempo. El precalentamiento del convertidor termina en el momento de alcanzar la temperatura de colada.

### 4.4 MATERIAS PRIMAS Y FERROALEACIONES.

Las materias primas (chatarras) y ferroaleaciones que se emplean en la fabricación del hierro nodular para este trabajo se mencionan a continuación, incluyendo su composición química.

Materias primas (chatarras).

#### Acero 1010.

% C	% Si	% Mn	% S	% P
0.0979	0.1815	1.135	0.0127	0.0134

#### Hierro colado A.

% C	% Si	% Mn	% S	% P
3.487	2.150	0.3189	0.0510	0.0376

#### Hierro colado B.

% C	% Si	% Mn	% S	% P
3.566	1.433	0.633	0.0725	0.0430

#### Hierro colado C.

% C	% Si	% Mn	% S	% P
3.531	1.831	0.0245	0.0181	0.0252

#### Hierro colado D.

% C	% Si	% Mn	% S	% P
3.577	2.061	0.705	0.0149	0.0188

#### Hierro colado E.

% C	% Si	% Mn	% S	% P
3.797	2.373	0.759	0.0138	0.0276

#### Hierro colado F.

% C	% Si	% Mn	% S	% P
3.607	2.396	0.618	0.0196	0.0259

#### Hierro colado G.

% C	% Si	% Mn	% S	% P
3.608	1.986	0.523	0.0180	0.0227

Las ferro aleaciones empleadas en este trabajo son:

- Y FeSi (75% Si). Para ajustar el silicio.
- Y Recarburante (100% C). Para ajustar el carbono.
- Y Fe-Si-5% Mg (46% Si). Se requiere para efectuar el tratamiento del metal líquido.
- Y FeSi inoculante (0.1% base silicio). Es requerido para la inoculación y post-inoculación.

Las composiciones químicas de las ferro aleaciones son:

Inoculante:

%Si	%Zr	%Ca	%Mn	%Al
65	5	1.5	3.5	1.5 máx.

Recarburante:

%C	%Cenizas	%S
99.8	0.1	0.008

Nodulizante:

%Mg	%Si	%Ce	%Ca	%Al
4.75-6.25	44-48	0.5-0.7	1.0	0.7

#### 4.5 TÉCNICA DE FUSIÓN

Durante el proceso de fundición se requiere establecer una metodología para lograr fabricar de manera eficaz, eficiente y sobre todo de mejor calidad las piezas. Para la producción de hierro nodular se consideran los siguientes aspectos:

- Balances de carga de acuerdo al tipo de hierro nodular que se desea fabricar
- Selección y limpieza de materias primas (chatarras).
- Preparación y carga del horno.
- Temperaturas de fusión, trabajo y de colada a moldes.
- Descorificación.
- Vaciado del horno.
- Tratamiento al metal líquido (nodularización e inoculación)
- Descorificación.
- Vaciado a moldes y post inoculación.

Estos puntos señalados se consideran como la técnica de fusión, es decir, son los pasos que hay que efectuar antes, durante y después de la fusión para obtener un metal líquido libre de gases y escorias principalmente. Posteriormente se lleva a cabo la metalografía y evaluación del hierro nodular producido.

##### 4.5.1 BALANCES DE CARGA.

Para efectuar los balances de carga se requiere de las composiciones químicas de las chatarras y de los niveles de adición de magnesio empleados para el tratamiento del metal líquido.

Los niveles de adición de magnesio utilizados para el tratamiento del metal líquido (nodularización) son: 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08 % de magnesio, con estos niveles se busca tener las transiciones del carbono grafito, es decir, el cambio de la morfología del carbono libre que precipita (carbono grafito hojuela, carbono grafito vermicular, carbono grafito nodular) para posteriormente decidir el nivel óptimo de magnesio para la nodularización.

De acuerdo a las composiciones químicas de las chatarras se procede al cálculo de los balances de carga.

Los siguientes cálculos muestran el desarrollo del balance de carga para un nivel de adición de 0.05% de magnesio.

1. El cálculo se realiza de acuerdo a la capacidad del convertidor que son para 18 kilogramos de chatarra y en algunos casos se utiliza 17 kilogramos.
2. Composición química promedio requerida y eficiencias por elemento empleadas:

	% C	% Si	% Mn	% S	% P
	3.6	2.45	0.6	0.015	0.05
Eficiencias	80	90	100	100	100

3. : Cálculo de los elementos requeridos en kilogramos: base de cálculo = 18 kg.

$$C = \left[ \frac{18kg \times \frac{3.6\%}{100\%}}{\frac{80\%}{100\%}} \right] = 0.81kg$$

$$Si = \left[ \frac{18kg \times \frac{2.45\%}{100\%}}{\frac{95\%}{100\%}} \right] = 0.4168kg$$

$$Mn = \left[ \frac{18kg \times \frac{0.6\%}{100\%}}{\frac{100\%}{100\%}} \right] = 0.108kg$$

$$S = \left[ \frac{18kg \times \frac{0.015\%}{100\%}}{\frac{100\%}{100\%}} \right] = 0.0027kg$$

$$P = \left[ \frac{18kg \times \frac{0.05\%}{100\%}}{\frac{100\%}{100\%}} \right] = 0.009kg$$

4. Cálculo de los elementos aportados por las chatarras en kilogramos:

Para este caso se utiliza 3.3 kg de acero 1010 y 14.7 kg de hierro colado F.

Aceros 1010:

$$C = \left[ 3.3kg \times \left( \frac{0.0979\%}{100\%} \right) \right] = 0.0032kg$$

$$Si = \left[ 3.3kg \times \left( \frac{0.1815\%}{100\%} \right) \right] = 0.00598kg$$



$$Mn = \left[ 3.3kg \times \left( \frac{1.135\%}{100\%} \right) \right] = 0.0374kg$$

$$S = \left[ 3.3kg \times \left( \frac{0.0127\%}{100\%} \right) \right] = 0.00041kg$$

$$P = \left[ 3.3kg \times \left( \frac{0.0134\%}{100\%} \right) \right] = 0.00044kg$$

Hierro colado F.

$$C = \left[ 14.7kg \times \left( \frac{3.577\%}{100\%} \right) \right] = 0.5258kg$$

$$Si = \left[ 14.7kg \times \left( \frac{2.061\%}{100\%} \right) \right] = 0.3029kg$$

$$Mn = \left[ 14.7kg \times \left( \frac{0.705\%}{100\%} \right) \right] = 0.1036kg$$

$$S = \left[ 14.7kg \times \left( \frac{0.0149\%}{100\%} \right) \right] = 0.0021kg$$

$$P = \left[ 14.7kg \times \left( \frac{0.0188\%}{100\%} \right) \right] = 0.0027kg$$

5. Cantidad total aportada por elemento en las chatarras:

Cantidad de elemento total = Cantidad de elemento aportado por acero 1010 + Cantidad de elemento aportado por el hierro colado F

$$C \text{ total} = 0.0032kg + 0.5258 \text{ kg}$$

$$C \text{ total} = 0.529 \text{ kg} = 2.930 \% C.$$

$$Si \text{ total} = 0.00598 \text{ kg} + 0.3029 \text{ kg}$$

$$Si \text{ total} = 0.30888 \text{ kg} = 1.716 \% Si.$$

$$Mn \text{ total} = 0.0374 \text{ kg} + 0.1036 \text{ kg}$$

$$Mn \text{ total} = 0.141 \text{ kg} = 0.7833 \% Mn.$$

$$S \text{ total} = 0.00041 \text{ kg} + 0.0021 \text{ kg}$$

$$S \text{ total} = 0.00251 \text{ kg} = 0.0139 \% S$$

$$P \text{ total} = 0.00044 \text{ kg} + 0.0027 \text{ kg}$$

$$P \text{ total} = 0.00314 \text{ kg} = 0.0174 \% P$$

6. Balances por elementos para ajustar la composición.

➤ Para el carbono.

Carbono requerido = Carbono total + Recarburante

$$0.81 \text{ kg} = 0.529 \text{ kg} + \text{Recarburante}$$

Considerando 100 % de carbono y 100 % de eficiencia:

$$\text{Recarburante} = 0.281 \text{ Kg.}$$

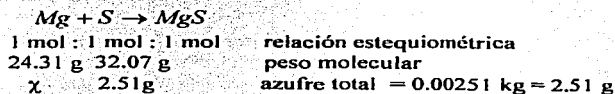
➤ Para el silicio:

Requerido = Si total + Si en Fe-Si-5% Mg + Inoculación + Post-inoculación + Fe-Si \*

\* si se requiere

Cálculo de Si en Fe-Si-5% Mg.

Va a estar en función del nivel de magnesio que se requiera, utilizando un nivel de 0.04% de magnesio. Primero se considera la reacción del magnesio con el azufre, para saber la cantidad de magnesio que requiere la reacción:



$$\chi = \left[ \frac{24.31 \text{ g} \times 2.51 \text{ g}}{32.07 \text{ g}} \right] = 1.90 \text{ g de magnesio se gasta con la reacción.}$$

Cálculo del magnesio aportado para un nivel de adición de 0.05% de magnesio.

$$\begin{array}{l} 18 \text{ kg} \text{-----} 100\% \\ \chi \text{-----} 0.05\% \end{array}$$

$$\chi = \left[ \frac{18 \text{ kg} \times 0.05\%}{100\%} \right] = 0.009 \text{ kg} = 9 \text{ g de magnesio.}$$

Cálculo del magnesio total.

Mg total = Mg requerido por la reacción + Mg aportado para un nivel de 0.05%

$$\text{Mg total} = 1.9 \text{ g} + 9 \text{ g} = 10.9 \text{ g.}$$

Cálculo de Fe-Si-5% Mg (nodulizante) para el nivel de 0.05%.

$$\begin{array}{l} 10.9 \text{ g} \text{-----} 5\% \\ \chi \text{-----} 100\% \end{array}$$

$$\chi = \left[ \frac{10.9 \text{ g} \times 100\%}{5\%} \right] = 218 \text{ g de Fe-Si-5\% Mg}$$

Cálculo de la cantidad de silicio contenido dentro del Fe-Si-5% Mg.

De acuerdo al análisis químico el nodulizante contiene 46% de silicio:

$$\begin{array}{l} 218 \text{ g de Fe-Si-5\% Mg} \text{-----} 100\% \\ \chi \text{-----} 46\% \end{array}$$

$$\chi = \left[ \frac{218 \text{ g} \times 46\%}{100\%} \right] = 100.28 \text{ g} = 0.10028 \text{ kg de silicio.}$$

Cálculo del inoculante y del silicio contenido en el mismo (Fe-Si con 0.1% base silicio y 65% de eficiencia).

$$\begin{array}{l} 18 \text{ kg} \text{-----} 100\% \\ \chi \text{-----} 0.1\% \end{array}$$

$$\chi = \left[ \frac{18 \text{ kg} \times 0.1\%}{100\%} \right] = 0.018 \text{ kg de silicio en el inoculante}$$

Tomando en cuenta la eficiencia del inoculante, por lo tanto:

$$\frac{0.018 \text{ kg} \cdot \frac{65\%}{100\%}}{x} = 1$$

$$x = \left[ \frac{0.018 \text{ kg} \times 100\%}{65\%} \right] = 0.02759 \text{ kg} = 27.69 \text{ g de inoculante.}$$

Por lo tanto para la post-inoculación se agrega la misma cantidad.

El balance para el silicio es:

Requerido = Si(total) + Si(nodulizante) + inoculación + post - inoculación + FeSi(ajuste)

$$0.4168 \text{ kg} = 0.3088 \text{ kg} + 0.10028 \text{ kg} + 0.018 \text{ kg} + 0.018 \text{ kg} + FeSi \left( \frac{75\%}{100\%} \right)$$

0.4168 kg = 0.44516 kg por lo que no es necesario agregar Fe-Si (75% Si) esto en porcentaje representa 2.47% de silicio y se acepta ya que se encuentra dentro del rango.

➤ Balance para el manganeso.

Manganeso requerido = Manganeso total + FeMn\* ; \* = si se requiere.

0.108 kg = 0.141 kg + FeMn ; por lo que no se requiere FeMn

la cantidad de 0.141 kg de Mn representan un porcentaje del 0.7833 y por consecuencia esta dentro del rango del manganeso.

➤ Balance para el azufre.

Azufre requerido = Azufre total

0.0027 kg = 0.00251 kg

la cantidad de 0.00251 kg de azufre representa un porcentaje del 0.0139 por lo que se encuentra sobre el limite permitido.

➤ Balance para el fósforo.

Fósforo requerido = Fósforo total

la cantidad de 0.00314 kg de azufre total representa un porcentaje del 0.0174 por lo que se trabaja en lo permitido.

La hoja de control queda establecida de la siguiente manera:

Nivel de magnesio: 0.05%

Materias primas	Kg	%	C (kg)	Si (kg)	Mn (kg)	S (kg)	P (kg)
Acero 1010	3.3	18.051	0.032	0.00598	0.0374	0.00041	0.00044
Hierro gris I	14.7	80.411	0.5258	0.3029	0.1036	0.0021	0.0027
FeMn	----	----	----	----	----	----	----
FeSi	----	----	----	----	----	----	----
Fe-Si-5%Mg	----	----	----	0.100028	----	----	----
Recarburante	0.281	1.538	0.281	----	----	----	----
Total	18.281	100	0.81	0.40916	0.141	0.00251	0.00314
Requerido			0.81	0.4168	0.108	0.00270	0.009

Las cargas de las materias primas para el balance de carga de los diferentes niveles de magnesio durante la fabricación del hierro nodular son las siguientes:

Nivel de 0.01% de magnesio

	Acero 1010	Hierro colado	Total (kg)
Prueba 1	7	10 <sup>F</sup>	17

Nivel de 0.02% de magnesio.

	Acero 1010 (kg)	Hierro colado (kg)	Total (kg)
Prueba 1	7	10 <sup>F</sup>	17

Nivel de 0.03% de magnesio.

	Acero (kg)	Hierro colado (kg)	Total (kg)
Prueba 1	7	10 <sup>F</sup>	17
Prueba 2	9	9 <sup>A</sup>	18

Nivel de 0.04% de magnesio

	Acero (kg)	Hierro colado (kg)	Total (kg)
Prueba 1	7	10 <sup>F</sup>	17
Prueba 2	12	5 <sup>B</sup>	17
Prueba 3	3	4 <sup>C</sup> y 11 <sup>D</sup>	18
Prueba 4	12	5 <sup>E</sup>	17

Nivel de 0.05% de magnesio.

	Acero (kg)	Hierro colado (kg)	Total (kg)
Prueba 1	7	10 <sup>F</sup>	17
Prueba 2	3	4 <sup>C</sup> y 11 <sup>D</sup>	18
Prueba 3	12	5 <sup>B</sup>	17

Nivel de 0.06% de magnesio.

	Acero (kg)	Hierro colado (kg)	Total (kg)
Prueba 1	3	4 <sup>C</sup> y 11 <sup>D</sup>	18
Prueba 2	16	2 <sup>A</sup>	18

Nivel de 0.07% de magnesio.

	Acero (kg)	Hierro colado (kg)	Total (kg)
Prueba 1	10	7 <sup>G</sup>	17
Prueba 2	6.3	11.7 <sup>A</sup>	18

Nivel de 0.08% de magnesio.

	Acero (kg)	Hierro colado (kg)	Total (kg)
Prueba 1	3	4 <sup>C</sup> y 11 <sup>D</sup>	18
Prueba 2	6.3	11.7 <sup>A</sup>	18

A continuación se proporcionan los datos empleados con respecto a las cantidades de ferro aleaciones y materias de ajuste para cada corrida.

Ferro aleación o materias de ajuste.	Cantidad en gramos.
Recarburante	397.5
Fe-Si-5%Mg	75
FeSi (inoculante)	26.15
FeSi (post-inoculación)	26.15

Tabla 4. Cantidades de ferro aleaciones y materias de ajuste para el cálculo de 0.01% de magnesio adicionado (Prueba uno).

Ferro aleación o materias de ajuste.	Cantidad en gramos.
Recarburante	397.5
Fe-Si-5%Mg	108.8
FeSi (inoculante)	26.15
FeSi (post-inoculación)	26.15

Tabla 5. Cantidades de ferro aleaciones y materias de ajuste para el cálculo de 0.02% de magnesio adicionado (Prueba uno).

Ferro aleación o materias de ajuste.	Cantidad en gramos.
Recarburante	397.5
Fe-Si-5%Mg	142.8
FeSi (inoculante)	26.15
FeSi (post-inoculación)	26.15

Tabla 6. Cantidades de ferro aleaciones y materias de ajuste para el cálculo de 0.03% de magnesio adicionado (Prueba uno).

Ferro aleación o materias de ajuste.	Cantidad en gramos.
Recarburante	487.4
Fe-Si-5%Mg	192.8
FeSi (75%)	82.26
FeSi (inoculante)	27.69
FeSi (post-inoculación)	27.69

Tabla 7. Cantidades de ferro aleaciones y materias de ajuste para el cálculo de 0.03% de magnesio adicionado (Prueba dos).

Ferro aleación o materias de ajuste.	Cantidad en gramos.
Recarburante	397.5
Fe-Si-5%Mg	176.8
FeSi (inoculante)	26.15
FeSi (post-inoculación)	26.15

Tabla 8. Cantidades de ferro aleaciones y materias de ajuste para el cálculo de 0.04% de magnesio adicionado (Prueba uno).

Ferro aleación o materias de ajuste.	Cantidad en gramos.
Recarburante	575
Fe-Si-5%Mg	238
FeSi (75%)	183.6
FeSi (inoculante)	26.15
FeSi (post-inoculación)	26.15

Tabla 9. Cantidades de ferro aleaciones y materias de ajuste para el cálculo de 0.04% de magnesio adicionado (Prueba dos).

Ferro aleación o materias de ajuste.	Cantidad en gramos.
Recarburante	272.5
Fe-Si-5%Mg	183.4
FeSi (inoculante)	27.69
FeSi (post-inoculación)	27.69

Tabla 10. Cantidades de ferro aleaciones y materias de ajuste para el cálculo de 0.04% de magnesio adicionado (Prueba tres).

Ferro aleación o materias de ajuste.	Cantidad en gramos.
Recarburante	563.5
Fe-Si-5%Mg	167.8
FeSi (75%)	165.4
FeSi (inoculante)	26.15
FeSi (post-inoculación)	26.15

Tabla 11. Cantidades de ferro aleaciones y materias de ajuste para el cálculo de 0.04% de magnesio adicionado (Prueba cuatro).

Ferro aleación o materias de ajuste.	Cantidad en gramos.
Recarburante	397.5
Fe-Si-5%Mg	210.8
FeSi (inoculante)	26.15
FeSi (post-inoculación)	26.15

Tabla 12. Cantidades de ferro aleaciones y materias de ajuste para el cálculo de 0.05% de magnesio adicionado (Prueba. uno).

Ferro aleación o materias de ajuste.	Cantidad en gramos.
Recarburante	272.5
Fe-Si-5%Mg	219.4
FeSi (inoculante)	27.69
FeSi (post-inoculación)	27.69

Tabla 13. Cantidades de ferro aleaciones y materias de ajuste para el cálculo de 0.05% de magnesio adicionado (Prueba dos).

Ferro aleación o materias de ajuste.	Cantidad en gramos.
Recarburante	575
Fe-Si-5%Mg	247.2
FeSi (75%)	179.06
FeSi (inoculante)	26.15
FeSi (post-inoculación)	26.15

Tabla 14. Cantidades de ferro aleaciones y materias de ajuste para el cálculo de 0.05% de magnesio adicionado (Prueba tres).

Ferro aleación o materias de ajuste.	Cantidad en gramos.
Recarburante	272.5
Fe-Si-5%Mg	255.4
FeSi (inoculante)	27.69
FeSi (post-inoculación)	27.69

Tabla 15. Cantidades de ferro aleaciones y materias de ajuste para el cálculo de 0.06% de magnesio adicionado (Prueba uno).

Ferro aleación o materias de ajuste.	Cantidad en gramos.
Recarburante	724.7
Fe-Si-5%Mg	246.6
FeSi (75%)	280.8
FeSi (inoculante)	27.69
FeSi (post-inoculación)	27.69

Tabla 16. Cantidades de ferro aleaciones y materias de ajuste para el cálculo de 0.06% de magnesio adicionado (Prueba dos).

Ferro aleación o materias de ajuste.	Cantidad en gramos.
Recarburante	416.6
Fe-Si-5%Mg	274.2
FeSi (75%)	122.4
FeSi (inoculante)	26.15
FeSi (post-inoculación)	26.15

Tabla 17. Cantidades de ferro aleaciones y materias de ajuste para el cálculo de 0.07% de magnesio adicionado (Prueba uno).

Ferro aleación o materias de ajuste.	Cantidad en gramos.
Recarburante	397.5
Fe-Si-5%Mg	108.8
FeSi (inoculante)	26.15
FeSi (post-inoculación)	26.15

Tabla 18 Cantidades de ferro aleaciones y materias de ajuste para el cálculo de 0.07% de magnesio adicionado (Prueba dos).

Ferro aleación o materias de ajuste.	Cantidad en gramos.
Recarburante	272.5
Fe-Si-5%Mg	327.4
FeSi (inoculante)	27.69
FeSi (post-inoculación)	27.69

Tabla 19. Cantidades de ferro aleaciones y materias de ajuste para el cálculo de 0.08% de magnesio adicionado (Prueba uno).

Ferro aleación o materias de ajuste.	Cantidad en gramos.
Recarburante	396
Fe-Si-5%Mg	422
FeSi (inoculante)	27.69
FeSi (post-inoculación)	27.69

Tabla 20. Cantidades de ferro aleaciones y materias de ajuste para el cálculo de 0.08% de magnesio adicionado (Prueba dos).

#### 4.5.2 SELECCIÓN Y PREPARACIÓN DE LA CARGA (CHATARRAS)

Para la fabricación del hierro nodular se utiliza dos tipos de materia prima (chatarras), motores de automóviles (4, 6 y 8 cilindros) y acero 1010.

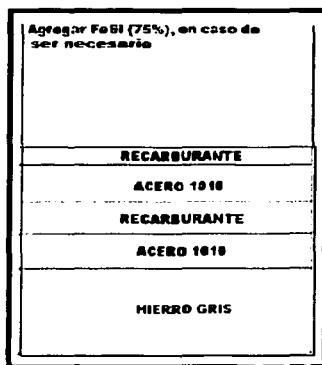
La preparación de la carga consta de los siguientes puntos:

- Limpieza.
- Recorte o empaque.
- Precalentamiento.

Los motores se fragmentan con el objetivo de que entren al horno en forma de pedacería y posteriormente se lleva a cabo la limpieza. La finalidad de la limpieza es eliminar la grasa de la carga, arena adherida y productos de corrosión que estas llegaran a tener. A continuación se procede a precalentar la carga con el fin de liberar la humedad, aumentar la velocidad de fusión y evitar el choque térmico. Cabe señalar que los motores que se fragmentan, se agregan al horno de inducción para fundirlos y así obtener una composición química homogénea que junto a la composición química del acero 1010 se utiliza para realizar los balances de carga.

#### 4.5.3. PREPARACIÓN Y CARGA AL HORNO.

Antes de cada fusión es recomendable observar la condición en la que se encuentra el refractario del horno debido a que este puede estar fracturado o se encuentra demasiado desgastado, logrando de esta manera evitar un accidente. La materia prima que se introduce al horno debe llevar una secuencia de carga, la utilizada generalmente durante cada fusión se ilustra en el siguiente esquema:



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Fig. 24. Secuencia de carga durante la fusión.

La figura anterior indica que lo primero que se agrega al horno de inducción es la chatarra de hierro gris debido a que tiene menor punto de fusión, cuando funde, se introduce una parte de la chatarra de acero 1010 (esto debido a la alta solubilidad del acero en hierro gris) seguida por el recarburante (carbono grafito) y después el resto del acero, esto se hace con el objetivo de que todo el recarburante se incorpore al metal líquido, y si se requiere agregar más recarburante posteriormente se agrega cuando este fundido todo el material, por último se agregan las ferroaleaciones, FeSi (75%) en caso de requerirse.

Para la determinación de la secuencia de carga es necesario contar con la ayuda de la definición del carbono equivalente y la relación utilizada es:

$$CE = \%C_{total} + \left( \frac{\%Si + \%P}{3} \right)$$

El carbono equivalente se calcula a partir de los elementos (C, Si y P) que aportan las chatarras empleadas para cada fusión. Calculando el CE se procede a identificar este porcentaje en el diagrama de fases Fe-Cg y se traza una línea vertical y donde intercepta a la línea liquidus se extrapola al eje de las temperaturas y se obtiene de esta forma el punto de fusión de cada una de las fusiones a partir de las chatarras.



#### 4.5.4. TEMPERATURA

Las temperaturas juegan un papel importante para que se lleve a cabo una buena fundición, para esto es necesario establecer la temperatura de trabajo, la cual se calcula a partir de la temperatura de fusión del hierro nodular a fabricar (carbono equivalente), además de determinar la temperatura de colada a moldes. Para saber la temperatura de fusión del hierro es necesario conocer la composición química del hierro nodular a fabricar, por lo que se calcula el carbono equivalente (descrito anteriormente) y por consecuencia se obtiene a partir de ésta la temperatura de trabajo. La temperatura de colada a moldes esta en función del volumen del metal líquido que contiene el convertidor, además del tiempo de reacción del nodulizante. La temperatura de trabajo establecida se encuentra en el rango de 1650-1665 °C.

#### 4.5.5. DESCORIFICACIÓN.

Durante todo el proceso de fusión, se forman inclusiones no metálicas sobre el metal líquido, estas inclusiones se conocen con el nombre de escorias y se originan debido a las impurezas contenidas en la carga original, a cualquier sílice o arcilla erosionado del refractario del horno, algunas cenizas de parte del combustible (por ejemplo en un horno de crisol) y debido a la combinación de los elementos del metal líquido con el oxígeno disuelto dentro del mismo, formando óxidos los cuales tienen como principal característica que tienen menor densidad que el metal líquido. Si la escoria no es retirada completamente del metal líquido antes de vaciar a moldes es seguro que las piezas producidas presentarán defectos (inclusiones), es por ello que cuando se funde toda la carga, es necesario retirar la escoria que se ha formado durante todo el proceso de fusión, el descorificante empleado en este trabajo es silicato de sodio sólido (granulado).

#### 4.5.6. VACIADO DEL HORNO.

Una vez que se ha alcanzado la temperatura de trabajo (1660 °C), y antes de vaciar el metal líquido al convertidor se toma una muestra preliminar (previamente descorificado), para esto primeramente se baja la potencia del horno y con la ayuda de la cuchara se toma la muestra de metal líquido y se vierte sobre el molde permanente el cual es de forma de moneda, una vez que ha solidificado la muestra se enfría, a esta muestra se le lleva a cabo un desbaste hasta que la superficie no presente porosidad o algún plano. Por último se determina la composición química con el espectrómetro de emisión de chispa, en caso de que los elementos se encuentren por debajo de la composición química requerida se realiza un cálculo para ajustar a la composición que se desea. Posteriormente se inicia el vaciado del metal líquido del horno de inducción al convertidor.

#### 4.5.7. TRATAMIENTO DEL METAL LÍQUIDO, DESCORIFICACIÓN Y VACIADO A MOLDES.

Cabe señalar que el tratamiento del metal líquido consta de llevar a cabo la nodularización en conjunto con la inoculación. Los moldes empleados son de arena para moldeo en verde cuya mezcla esta compuesta por arena sílica, 10% de bentonitas (6% de bentonita cálcica y 4% de bentonita sódica) y una humedad de 4%.

El procedimiento que se sigue es el siguiente:

1. Antes de vaciar el metal líquido a la primera cámara del convertidor, se agrega el agente nodulizante (FeSi-5% Mg) y el inoculante (75% Si) a la segunda cámara por medio del orificio que presenta la tapa superior (ver diseño) y al mismo tiempo se comienza a bascular el horno de inducción procurando que no se derrame el metal líquido de la primera cámara a

la segunda cámara del convertidor, una vez introducidos se sella el orificio con su tapa correspondiente, esta tapa es precalentada desde el momento que comienza la fusión y se hace con la intención de que cuando se realice el tratamiento, el metal líquido que este en contacto con la tapa no solidifique y así evitarse problemas al momento de quitarla. Enseguida se vierte el metal líquido dentro de la primera cámara del convertidor A continuación se engancha el convertidor con la grúa y se coloca en posición para efectuar el giro, teniendo la precaución de que el metal líquido no se derrame a la segunda cámara. Posteriormente se efectúa el giro del convertidor hasta el ángulo de inclinación calculado, para esto se tiene un tope que al momento de efectuar el giro se coloca, por lo que no hay necesidad de realizar demasiado esfuerzo.

2. El tiempo de reacción empleado oscila entre 45 segundos y 70 segundos, terminada la reacción se quita el tope para regresar el convertidor a una posición que permita primeramente que el metal líquido no regrese a la primera cámara y permita quitar la tapa pequeña.
3. Después de haber retirado la tapa, se retira la escoria que se llevo a generar y antes de vaciar a los moldes se toma una muestra para el análisis final de la composición química.
4. Por último, se efectúa el vaciado a los moldes y se realiza la post inoculación la cual se lleva a cabo con FeSi (75% Si) cuya granulometría empleada es de +100 mallas. La post inoculación se efectúa al momento de vaciar el metal líquido a los moldes.

#### 4.6 METALOGRAFÍA Y EVALUACIÓN.

Después de haber realizado las fusiones (para los diferentes niveles de magnesio) y obtenido las piezas fabricadas, se procede a efectuar la metalografía correspondiente para cada nivel de magnesio.

Para la metalografía se utilizan las barras cilíndricas, figura 25, a las cuales se les hace un corte transversal para poder llevar a cabo dicho estudio. El procedimiento que se sigue es el siguiente:

1. Se toma una muestra de las barras cilíndricas llevando a cabo un corte transversal aproximadamente a la mitad de la barra.
2. Posteriormente la muestra se desbasta (lija 80) de tal forma que no se originen planos.
3. A continuación la muestra se le hace el desbaste fino, primero por la lija 240, después por la lija 320, enseguida por la lija 400 y por último por la lija 600. Cabe señalar que cada vez que se pase de una a otra lija la muestra debe rotarse a 90°, esto se hace con la finalidad de eliminar las líneas que se formaron en la muestra en la lija anterior.
4. Por último, se lleva a cabo el pulido grueso y fino respectivamente de la muestra. Primero se efectúa el pulido grueso con paño canuas empleando alúmina de 1 m $\mu$  y un poco de agua. Para finalizar la metalografía, a la muestra se le realiza el pulido fino utilizando paño microcloth con alúmina de 0.3 y/o 0.05 m $\mu$  y una pequeña cantidad de agua.

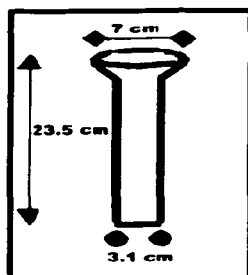


Figura 25 pieza de hierro fabricada para los diferentes niveles de magnesio.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Cuando se ha llevado a cabo la metalografía se procede a evaluar la microestructura de la muestra con ayuda de patrones. Esta evaluación consiste de los siguientes puntos:

1. Porcentaje de nodularidad.
2. Tamaño del nódulo.
3. Cantidad de nódulos por unidad de área (densidad).
4. Tipo de matriz.

Para la evaluación de los puntos anteriores se utilizaron los patrones de la norma ASTM A 247-267 (1978), ver apéndice A.

Para la evaluación de los tres primeros aspectos la muestra no debe de ser atacada, y para realizar tal evaluación se emplea un microscopio y los patrones de dicha evaluación. Los aumentos que se requieren son de 100X, ya que los patrones así lo indican.

Para el caso del tipo de matriz, la muestra es atacada con nital 3 para hierros, posteriormente con la ayuda de los patrones se establece el tipo de matriz que presenta la muestra. Se evalúa a 100X, esto se hace de acuerdo a los patrones de evaluación.

## CAPITULO V.

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Durante todas las fusiones desarrolladas en este trabajo algunos parámetros se trataron de mantener constante, por lo general se trabajaron en las mismas condiciones de temperatura, ángulo de giro del convertidor y tiempo de reacción del nodulizante con el objetivo primordial de que los resultados obtenidos fueran reproducibles, además de que el tiempo que transcurre desde el momento de vaciar del horno de inducción hasta lograr vaciar a los moldes sea repetitivo para todas las fusiones. Por lo que, de manera general a continuación se muestra el valor de los parámetros mencionados anteriormente.

Temperatura de colada (°C)	Tiempo de reacción del nodulizante (S)	Ángulo de giro del convertidor (grados)	Tiempo total (S)
1650-1665	50-70	125	225-250

Tabla 22. Parámetros que se mantuvieron constantes durante todas las fusiones. Tiempo total = Tiempo que transcurre desde el momento de la colada del horno de inducción hasta el llenado a moldes.

Después de haber establecido la cantidad de materia prima, niveles de adición de magnesio para el tratamiento de nodularización y cantidad de ferro aleaciones (materias primas de ajuste) junto con los parámetros descritos en la tabla anterior para la fabricación del hierro nodular, se procede posteriormente con el seguimiento de los resultados que se obtuvieron durante este trabajo, los cuales se desglosan principalmente en dos etapas, que constan de:

1. Composición química final del metal líquido para los diferentes niveles de adición de magnesio.
2. Evaluación del hierro obtenido (tamaño de nódulo, densidad, porcentaje de nodularidad y tipo de matriz)

#### 5.1 COMPOSICIÓN QUÍMICA FINAL DE LOS HIERROS FABRICADOS.

Las composiciones químicas que se presentan a continuación, representan a las composiciones químicas finales de los hierros que se fabricaron para los diferentes niveles de adición de magnesio, así mismo se indica el carbono equivalente (CE) para cada corrida.

	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Mg
Prueba 1	3.655	2.241	0.709	0.0194	0.0156	0.0069

Tabla 22. Composición química final del hierro fabricado con adición de 0.01 % de magnesio. CE = 4.408%.

	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Mg
Prueba 1	3.439	2.424	0.697	0.0172	0.0123	0.0142

Tabla 23. Composición química final del hierro fabricado con adición de 0.02 % de magnesio. CE = 4.252%.

	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Mg
Prueba 1	3.615	1.920	0.534	0.0258	0.0227	0.0129
Prueba 2	3.583	1.457	0.688	0.0202	0.0148	0.0113

Tabla 24. Composición química final del hierro fabricado con adición de 0.03 % de magnesio. CE<sub>1</sub> = 4.408%; CE<sub>2</sub> = 4.263%.

	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Mg
Prueba 1	3.667	2.387	0.696	0.0197	0.0133	0.0150
Prueba 2	3.292	2.087	0.704	0.0215	0.0219	0.0245
Prueba 3	4.206	2.654	0.625	0.0145	0.0255	0.0185
Prueba 4	3.310	2.010	0.761	0.0186	0.0115	0.0122

Tabla 25. Composición química final del hierro fabricado con adición de 0.04 % de magnesio. CE<sub>1</sub> = 4.469%; CE<sub>2</sub> = 3.994%; CE<sub>3</sub> = 5.095%; CE<sub>4</sub> = 3.986%.

	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Mg
Prueba 1	3.254	2.582	0.4198	0.0198	0.0122	0.0377
Prueba 2	3.461	2.430	0.653	0.0192	0.0112	0.0197
Prueba 3	3.560	2.428	0.723	0.0212	0.0189	0.0208

Tabla 26. Composición química final del hierro fabricado con adición de 0.05 % de magnesio. CE<sub>1</sub> = 4.121%; CE<sub>2</sub> = 4.277%; CE<sub>3</sub> = 4.376%.

	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Mg
Prueba 1	3.459	2.575	0.577	0.0194	0.0148	0.0210
Prueba 2	3.599	1.806	0.847	0.0257	0.0172	0.0234

Tabla 27. Composición química final del hierro fabricado con adición de 0.06 % de magnesio. CE<sub>1</sub> = 4.323%; CE<sub>2</sub> = 4.209%.

	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Mg
Prueba 1	3.717	2.179	0.685	0.0198	0.0146	0.0315
Prueba 2	3.665	1.996	0.689	0.0170	0.0170	0.0325

Tabla 28. Composición química final del hierro fabricado con adición de 0.07 % de magnesio. CE<sub>1</sub> = 4.449%; CE<sub>2</sub> = 4.336%.

	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Mg
Prueba 1	3.533	2.469	0.662	0.0192	0.0129	0.0365
Prueba 2	3.248	2.468	0.728	0.0241	0.0175	0.0379

Tabla 29. Composición química final del hierro fabricado con adición de 0.08 % de magnesio. CE<sub>1</sub> = 4.362%; CE<sub>2</sub> = 4.078%.

## 5.2 EFICIENCIAS O RENDIMIENTOS DEL MAGNESIO.

Se calculan dos tipos de eficiencias para el magnesio

1. La primera eficiencia se considera con respecto al proceso de nodulización, para este cálculo se considera únicamente el porcentaje de magnesio adicionado (agregado) y el porcentaje de azufre en la composición química final.
2. La segunda eficiencia reportada es con respecto al magnesio efectivo o residual, para esta cálculo se considera el porcentaje de azufre de la composición química final, además de la relación estequiométrica que existe entre el magnesio y el azufre y lo anterior se relaciona con el porcentaje de magnesio adicionado.

### 5.2.1 EFICIENCIA DEL MAGNESIO CON EL EMPLEO DEL CONVERTIDOR DE DOBLE CÁMARA.

Las eficiencias del magnesio es calculado tomando en cuenta la adición de magnesio y la composición química final del hierro que se fabrico, es decir, considerando únicamente el porcentaje de adición de magnesio sin considerar el magnesio requerido por la reacción con el azufre. El cálculo que se lleva a cabo es el siguiente:

Adición de 0.01% de magnesio, prueba uno.

Composición química final del magnesio =0.069% , con estos datos se procede a calcular la eficiencia o rendimiento del magnesio contenido en el nodulizante empleado en el convertidor de doble cámara, por lo tanto se establece la siguiente operación:

Porcentaje de adición de magnesio -----representa el 100% de eficiencia  
 Porcentaje del magnesio en la composición química final-----¿% de eficiencia?

Sustituyendo de acuerdo a los datos presentados:

0.01 % de magnesio-----100%  
 0.0069% de magnesio-----¿% η?

$\eta = \left[ \frac{0.0069\% \times 100\%}{0.01\%} \right] = 69\%$ , de esta forma es el calculo para las eficiencias del magnesio, por lo que a continuación se muestran los resultados de estas eficiencias para cada porcentaje de adición de magnesio y para cada corrida.

% de magnesio adicionado para el tratamiento de nodularización.	Prueba	% de magnesio en la composición química final.	Rendimiento del Mg (%η <sub>Mg</sub> )
0.01	Uno	0.0069	69.0
0.02	Uno	0.0142	71.0
0.03	Uno	0.0129	43.0
	Dos	0.0113	37.66
0.04	Uno	0.0150	37.5
	Dos	0.0245	61.25
	Tres	0.0185	46.25
	Cuatro	0.0122	30.5
0.05	Uno	0.0377	75.4
	Dos	0.0197	39.4
	Tres	0.0208	41.6
0.06	Uno	0.0210	35.0
	Dos	0.0234	39.0
0.07	Uno	0.0315	45.0
0.07	Dos	0.0379	54.14
	Uno	0.0365	45.62
0.08	Uno	0.0365	45.62
	Dos	0.0379	47.37

Tabla 30. Resultados de las eficiencias del magnesio en el convertidor de doble cámara

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 5.2.2 EFICIENCIA DEL MAGNESIO CONSIDERANDO EL PORCENTAJE DE ADICIÓN Y LA REACCIÓN CON EL AZUFRE.

Para obtener la eficiencia del magnesio es necesario contar con la composición química final del azufre, el porcentaje de adición de magnesio para el tratamiento del metal líquido y también la reacción química que existe entre el azufre y el magnesio. La secuencia de este cálculo se presenta a continuación:

Para la muestra de hierro con adición de 0.04% y prueba uno, la composición química final del azufre es de 0.0133%, tomando en cuenta la reacción química entre el azufre y el magnesio y la masa molecular de ambos, por lo que la relación es:



Lo anterior indica que de acuerdo al porcentaje de azufre presente en la composición química final para esta muestra, un porcentaje de magnesio reacciona con el azufre, y se compara con lo adicionado y se obtiene el porcentaje de eficiencia del magnesio efectivo, por lo tanto y siguiendo con los cálculos se tiene que:

El porcentaje de magnesio que se requiere para que reaccione completamente con todo el azufre presente es:

$$\%Mg = \left( \frac{24.31g \times 0.0133\%}{32.07g} \right) = 0.01\%$$

$$\text{Si: } \%Mg_{\text{total}} = \%Mg_{\text{adicionado}} - \%Mg_{\text{reacción}}$$

$$\%Mg_{\text{total}} = 0.04 + 0.01 = 0.05$$

de manera que el rendimiento del magnesio considerando la reacción y la adición es:

$$\begin{array}{l} \% \text{ de Mg total} \text{-----} 100\% \\ \% \text{ de Mg composición química final} \text{-----} \% \eta \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{esto es:} \\ 0.05\% \text{-----} 100\% \\ 0.0150\% \text{-----} \% \eta \end{array}$$

$$\eta = \left( \frac{0.0150\% \times 100\%}{0.05\%} \right) = 30\%$$

A continuación se presentan los resultados del rendimiento del magnesio para cada prueba.

% de magnesio adicionado.	Prueba	% de azufre en la composición química final.	% de magnesio requerido por la reacción.	% de magnesio total (adicionado más la reacción)	% de magnesio en la composición química final.	Rendimiento del magnesio (%)
0.01	Uno	0.0156	0.0118	0.0218	0.0069	31.65
0.02	Uno	0.0123	0.009	0.029	0.0142	48.96
0.03	Uno	0.0227	0.017	0.047	0.0129	27.44
	Dos	0.0148	0.011	0.041	0.0113	27.56
0.04	Uno	0.0133	0.010	0.05	0.0150	30.00
	Dos	0.0219	0.016	0.056	0.0245	43.75
	Tres	0.0255	0.019	0.059	0.0185	31.35
	Cuatro	0.0115	0.008	0.048	0.0122	25.41
0.05	Uno	0.0122	0.009	0.059	0.0377	63.89
	Dos	0.0112	0.008	0.058	0.0197	33.96
	Tres	0.0189	0.014	0.064	0.0208	32.5
0.06	Uno	0.0148	0.011	0.071	0.0210	29.57
	Dos	0.0172	0.013	0.073	0.0234	32.05
0.07	Uno	0.0146	0.011	0.081	0.0315	38.88
0.07		0.0170	0.012	0.082	0.0379	46.21
0.08	Uno	0.0129	0.009	0.089	0.0365	41.01
	Dos	0.0175	0.013	0.093	0.0379	40.75

Tabla 31. Resultados de la eficiencia del magnesio considerando la reacción y el nivel de adición.

### 5.3 EVALUACIÓN DE LOS HIERROS FABRICADOS.

La evaluación de los hierros fabricados por medio del convertidor de doble cámara consiste de evaluar con la ayuda del microscopio y patrones, la microestructura tomando en cuenta el tamaño del nódulo, densidad, porcentaje de nodularidad y tipo de matriz.

Adición de magnesio	Prueba	Tamaño de nódulo (100X)	Densidad (nod/mm <sup>2</sup> ) (100X)	Porcentaje de nodularidad	Tipo de matriz (%P-%F)
0.02%	Dos	6	100-150	70-75	70-30
0.03%	Uno	6	50-100	40-50	70-30
	Dos	6	25	50-60	90-10
0.04%	Uno	6	100	50	70-30
	Dos	6-7	150	80-85	85-15
	Tres	7	200-250	85-90	90-10
	Cuatro	7	150-200	80-85	50-50
	Uno	7	150-200	90-95	85-15
0.05%	Dos	7	100-150	90-95	80-20
	Tres	7	150-200	80-85	85-15
	Cuatro	7	150-200	85-90	95-5
	Uno	6	100-150	85-90	75-25
0.06%	Dos	6	100	95-100	80-20
	Uno	6	100-150	95-100	90-10
0.07%	Dos	6	100	95-100	85-15
	Uno	6	100-150	95-100	80-20
0.08%	Uno	6	100-150	95-100	80-20
	Dos	5-6	150-200	95-100	90-10

Tabla 32. Resultados de la evaluación de los hierros fabricados para los diferentes niveles de adición de magnesio. %P-%F = porcentaje de perlita y porcentaje de ferrita en cada una de las muestras.

TESIS CON  
 FALTA DE ORIGEN



Para la muestra de hierro con adición de 0.01% de magnesio se obtuvo un hierro gris con tipo de hojuela "C", tamaño de la hojuela 3-4 y matriz 95%perlita-5%ferrita.

#### 5.2.2.1 Evaluación del tamaño de nódulo, densidad (nódulos/mm<sup>2</sup>) y porcentaje de nodularidad.

Para la evaluación del tamaño del nódulo de grafito no es necesario atacar las muestras de los hierros con nital 3, además y de acuerdo con los patrones dicha evaluación es observada al microscopio a 100X, y posteriormente se obtienen las fotografías con el analizador de imágenes.

#### 5.2.2 EVALUACIÓN GENERAL DE LOS HIERROS FABRICADOS

De manera conjunta se presentan a continuación los resultados de la evaluación de los hierros fabricados, tomando para ésta evaluación el tamaño de nódulo, densidad, porcentaje de nodularidad y el tipo de matriz.

TESTE C  
FALLA DE ORIGEN



Foto 1. Prueba uno. Muestra de hierro con adición de 0.01% de magnesio, grafito tipo C con tamaño No.4, a 100X sin ataque.

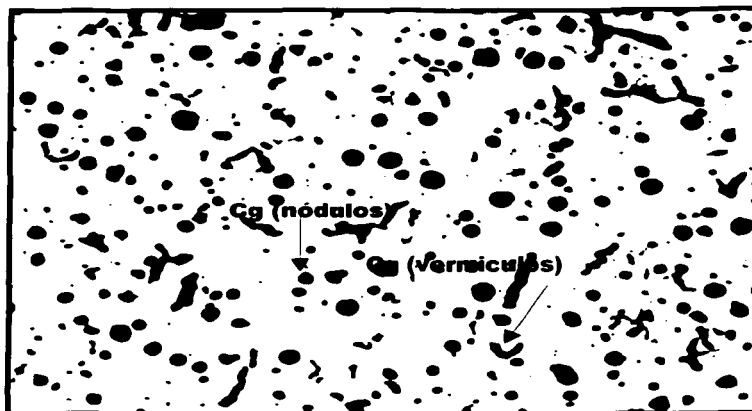


Foto 2. Prueba uno. Hierro con adición de 0.02% de magnesio, tamaño de nódulo No. 6, densidad de 100-150 nódulos/mm<sup>2</sup>, % de nodularidad de 70-75.a 100X sin ataque.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

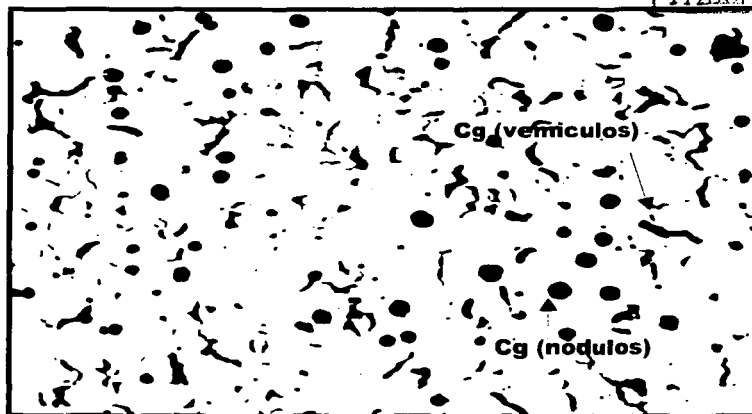


Foto 3. Prueba uno. Muestra de hierro con adición de 0.03% de magnesio, tamaño de nódulo No. 6, densidad de 50-100 nódulos/mm<sup>2</sup>, % de nodularidad de 40-50. a 100X sin ataque.

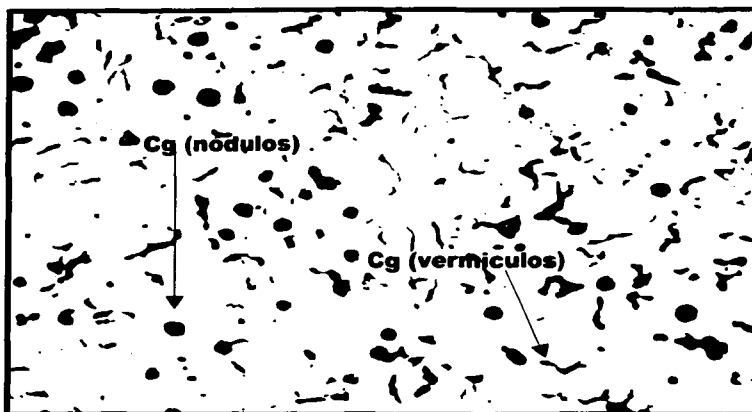


Foto 4. Prueba dos. Muestra de hierro con adición de 0.03%, tamaño de nódulo No. 6, densidad de 25 nódulos/mm<sup>2</sup>, % de nodularidad de 40-50, a 100X sin ataque.

FALLA DE ORIGEN

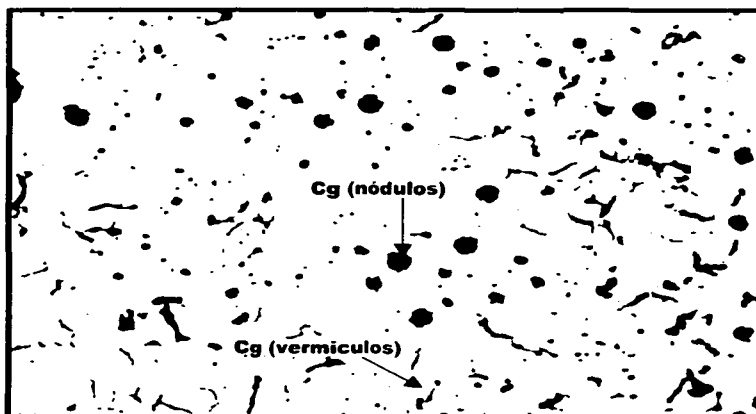


Foto 5. Prueba uno. Muestra de hierro con adición de 0.04% de magnesio, tamaño de nódulo No. 6, densidad de 50-100. % de nodularidad de 50-60, a 100X sin ataque.

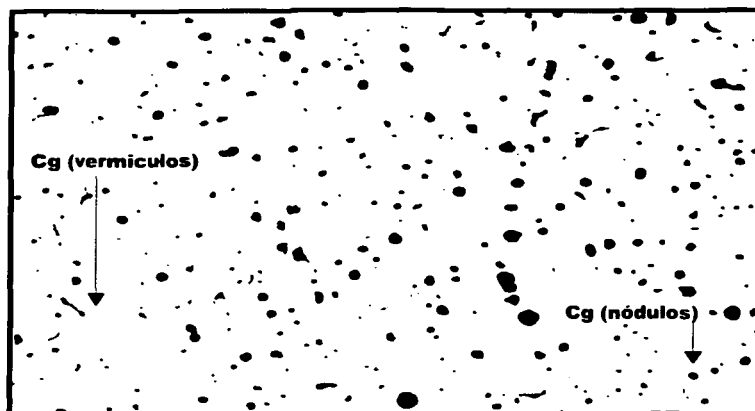


Foto 6. Prueba dos. Muestra de hierro con adición de 0.04% de magnesio, tamaño de nódulo No. 6-7, densidad de 150 nódulos/mm<sup>2</sup>, % de nodularidad de 80-90, a 100X sin ataque.

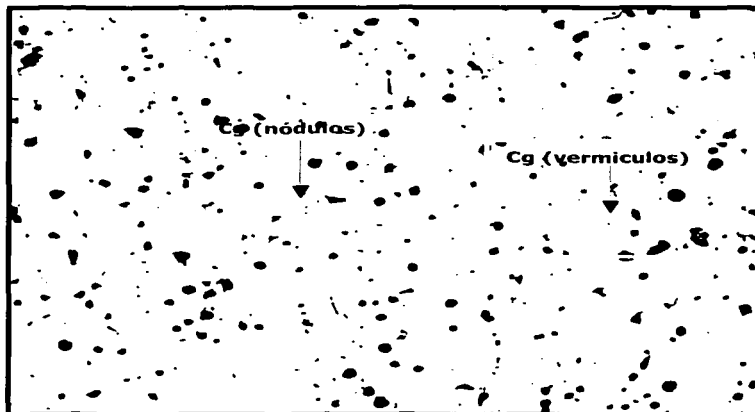


Foto 7. Prueba tres. Muestra de hierro con adición de 0.04% de magnesio, tamaño de nódulo No. 6-7, densidad de 150 nódulos/mm<sup>2</sup>, % de nodularidad de 80-90, a 100X sin ataque.

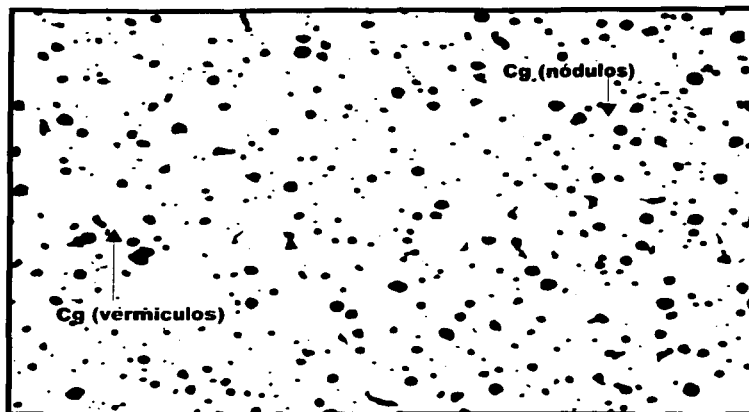


Foto 8. Prueba cuatro. Muestra de hierro con adición de 0.04% de magnesio, tamaño de nódulo No. 7, densidad de 150-200 nódulos/ mm<sup>2</sup>, % de nodularidad de 80-85, a 100X sin ataque.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

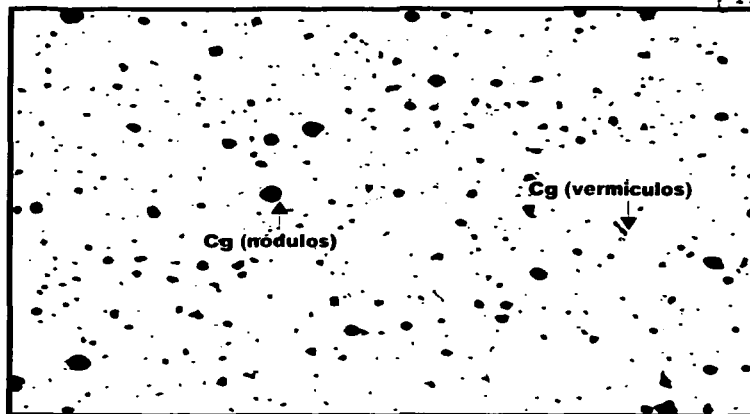


Foto 9. Prueba uno. Muestra de hierro con adición de 0.05% de magnesio, tamaño de nódulo No. 7, densidad de 150-200 nódulos/ mm<sup>2</sup>, % de nodularidad de 85-90, a 100X sin ataque.

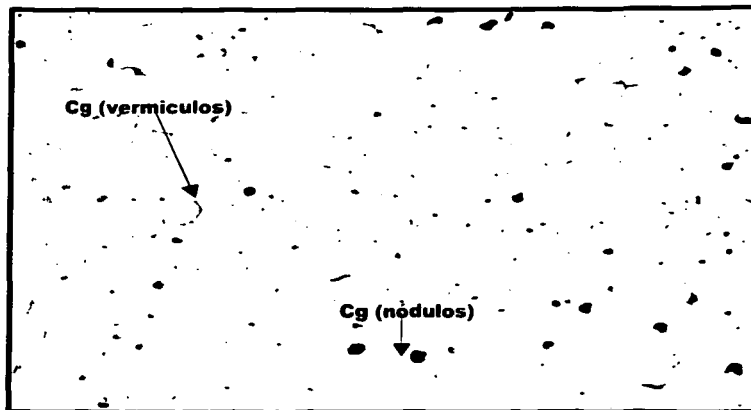


Foto 10. Prueba dos. Muestra de hierro con adición de 0.05% de magnesio, tamaño de nódulo No. 7, densidad de 150-200 nódulos/mm<sup>2</sup>, % de nodularidad de 80, a 100X sin ataque.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

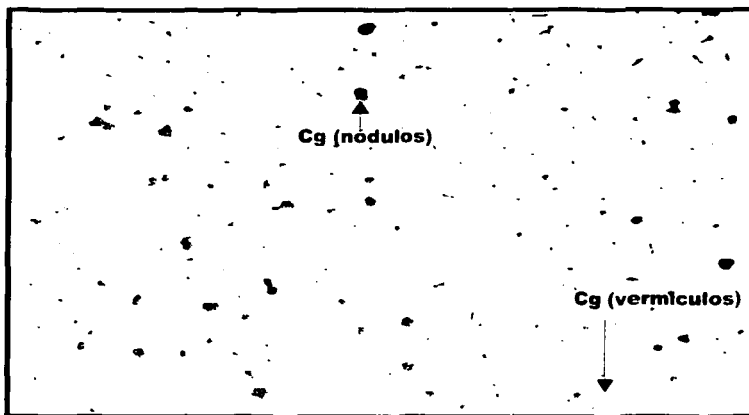


Foto 11. Prueba tres. Muestra de hierro con adición de 0.05% de magnesio, tamaño de nódulo No. 7, densidad de 100-150 nódulos/mm<sup>2</sup>, % de nodularidad de 85-90, a 100X sin ataque.

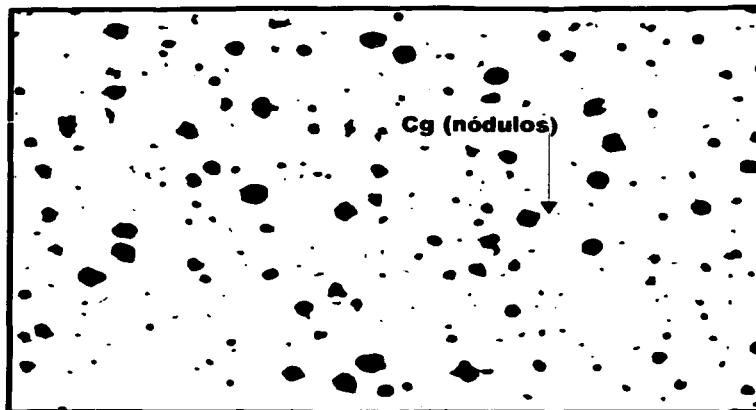


Foto 12. Prueba uno. Muestra de hierro con adición de 0.06% de magnesio, tamaño de nódulo No. 6, densidad de 100-150 nódulos/mm<sup>2</sup>, % de nodularidad de 90-95, a 100X sin ataque.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

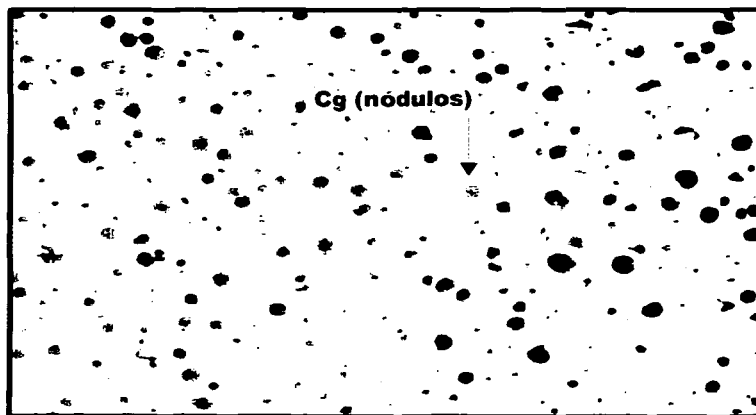


Foto 13. Prueba dos. Muestra de hierro con adición de 0.06% de magnesio, tamaño de nódulo No. 6, densidad de 100-150 nódulos/mm<sup>2</sup>, % de nodularidad de 90-95, a 100X sin ataque.

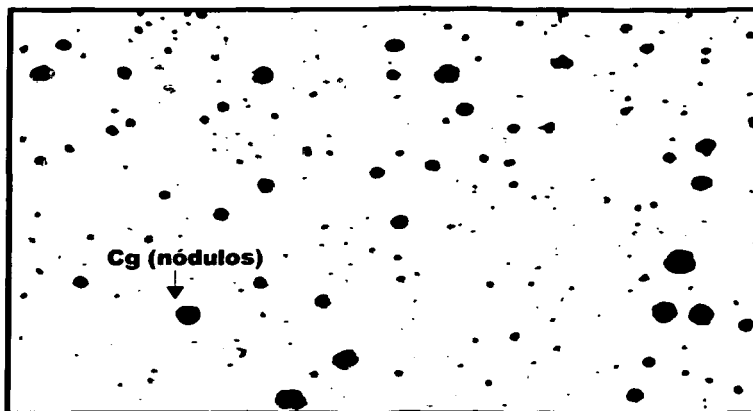


Foto 14. Prueba uno. Muestra de hierro con adición de 0.07% de magnesio, tamaño de nódulo No. 6, densidad de 100 nódulos/mm<sup>2</sup>, % de nodularidad de 95-100, a 100X sin ataque.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

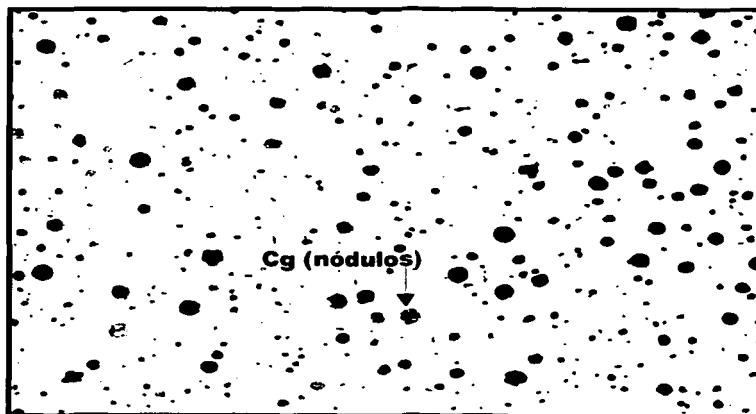


Foto 15. Prueba dos. Muestra de hierro con adición de 0.07% de magnesio, tamaño de nódulo No. 6, densidad de 150 nódulos/mm<sup>2</sup>, % de nodularidad de 95-100, a 100X sin ataque.



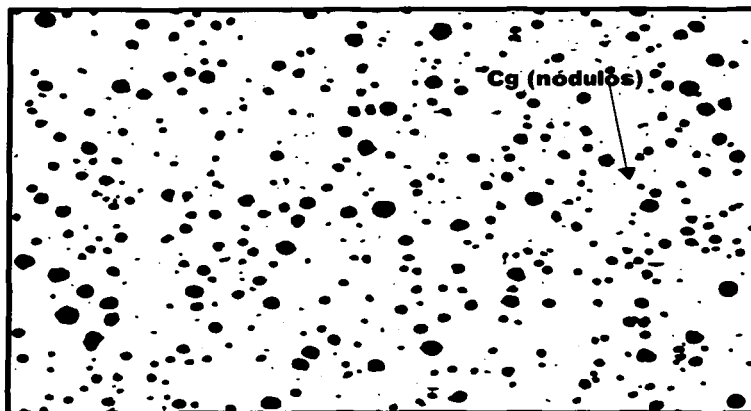


Foto 16. Prueba uno. Muestra de hierro con adición de 0.08% de magnesio, tamaño de nódulo No. 6, densidad de 200-250 nódulos/mm<sup>2</sup>, % de nodularidad de 100, a 100X sin ataque.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

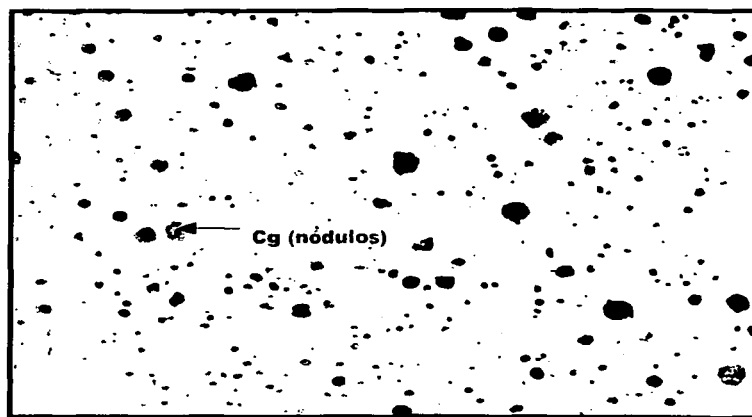


Foto 17. Prueba dos. Muestra de hierro con adición de 0.08% de magnesio, tamaño de nódulo No.5-6, densidad de 150-200 nódulos/mm<sup>2</sup>, % de nodularidad de 100, a 100X sin ataque.

### 5.2.1 EVALUACIÓN DE LA MATRIZ.

Para la evaluación de la matriz es necesario atacar las muestras de los hierros con nital 3, además y de acuerdo con los patrones dicha evaluación es observada al microscopio a 100X, y se obtienen las fotografías con el analizador de imágenes.



Foto 18. Prueba uno. Muestra de hierro con adición de 0.01% de magnesio, atacada con nital 3, matriz perlita ferrita, a 100X.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

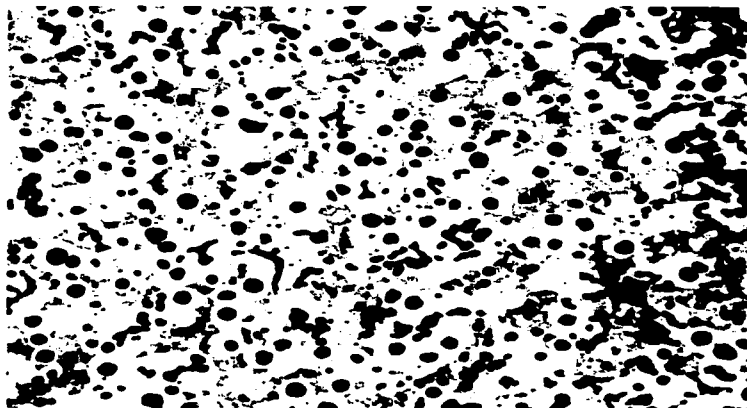


Foto 19. Prueba uno. Muestra de hierro con adición de 0.02% de magnesio, atacada con nital 3, matriz perlita-ferrita, a 100X.

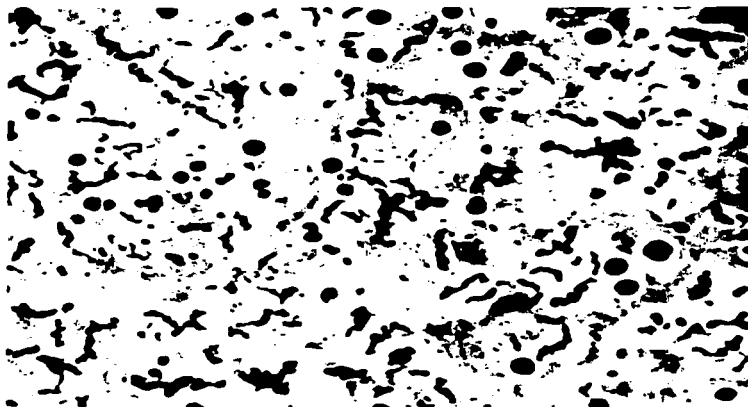


Foto 20. Prueba uno. Muestra de hierro con adición de 0.03% de magnesio, atacada con nital 3, matriz perlita-ferrita, a 100X.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

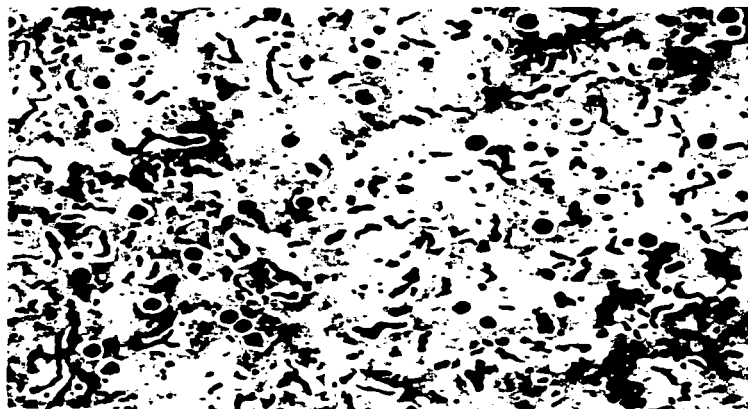


Foto 21. Prueba dos. Muestra de hierro con adición de 0.03% de magnesio, atacada con nital 3, matriz perlita-ferrita, a 100X.

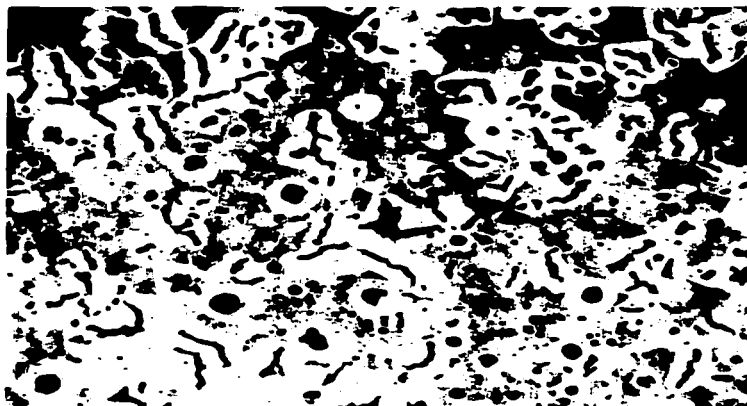


Foto 22. Prueba uno. Muestra de hierro con adición de 0.04% de magnesio, atacada con nital 3, matriz perlita-ferrita, a 100X.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

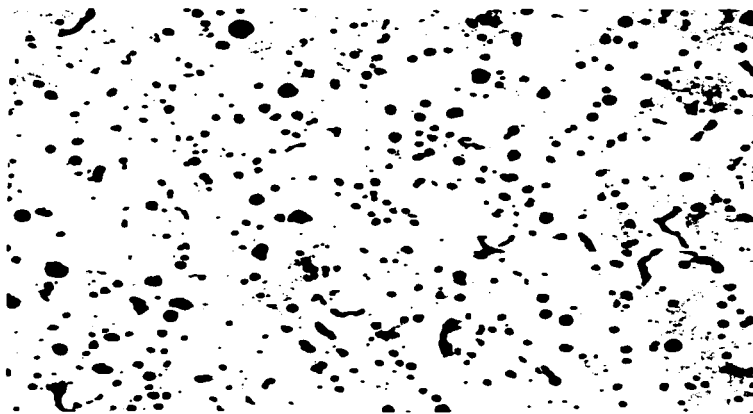


Foto 23. Prueba dos. Muestra de hierro con adición de 0.04% de magnesio, atacada con nital 3, matriz perlita-ferrita, a 100X.

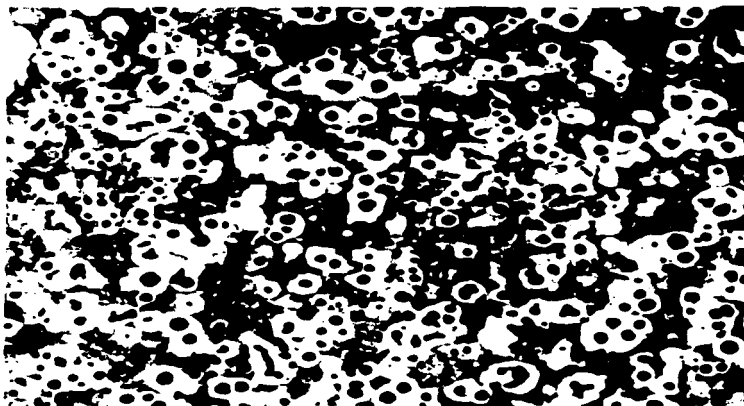


Foto 24. Prueba tres. Muestra de hierro con adición de 0.04% de magnesio, atacada con nital 3, matriz perlita-ferrita, a 100X.

TIENE CON  
FALLA DE ORIGEN

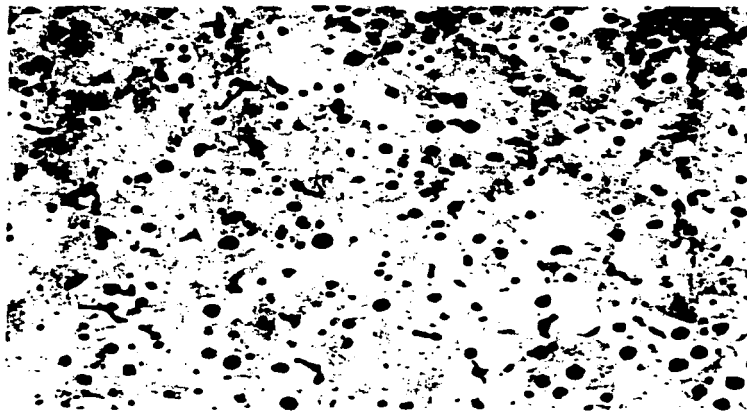


Foto 25. Prueba cuatro. Muestra de hierro con adición de 0.04% de magnesio, atacada con nital 3, matriz perlita-ferrita, a 100X.

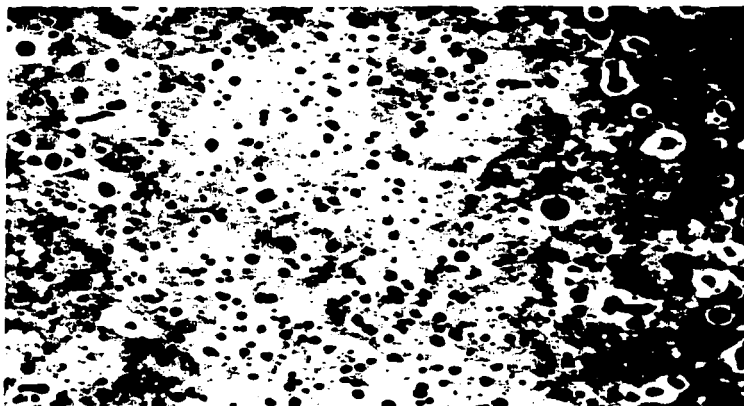


Foto 26. Prueba uno. Muestra de hierro con adición de 0.05% de magnesio, atacada con nital 3, matriz perlita-ferrita, a 100X.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

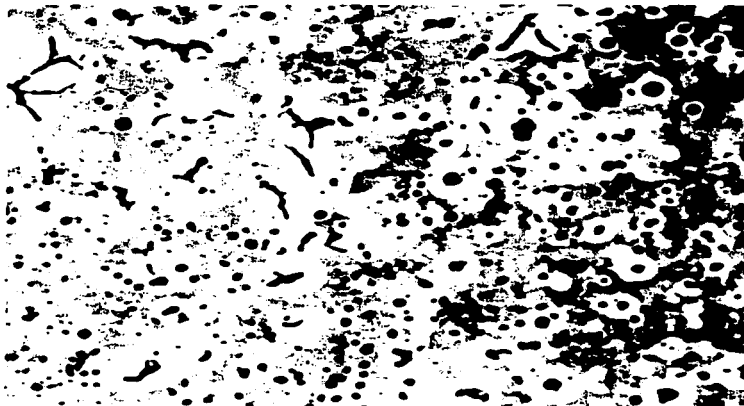


Foto 27. Prueba dos. Muestra de hierro con adición de 0.05% de magnesio, atacada con nital 3, a 100X.

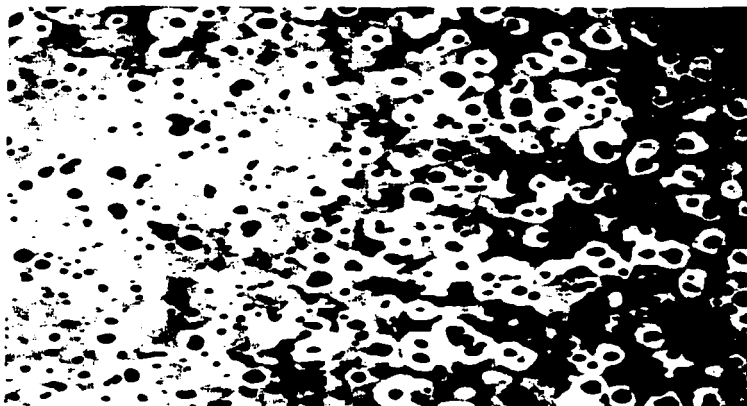


Foto 28. Prueba tres. Muestra de hierro con adición de 0.05% de magnesio, atacada con nital 3, matriz perlita-ferrita, a 100X.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

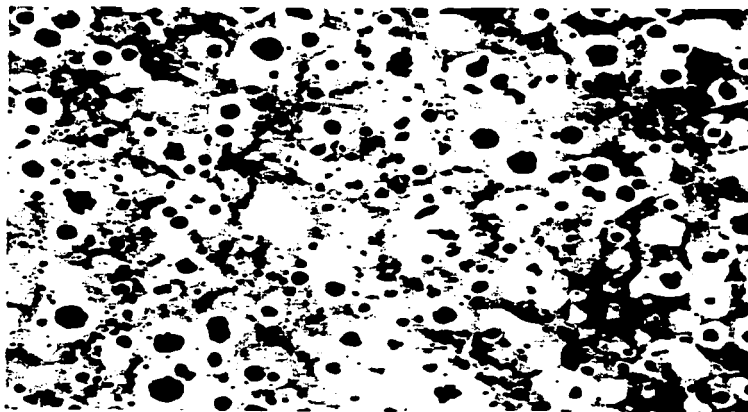


Foto 29. Prueba uno. Muestra de hierro con adición de 0.06% de magnesio, atacada con nital 3, matriz perlita-ferrita, a 100X.

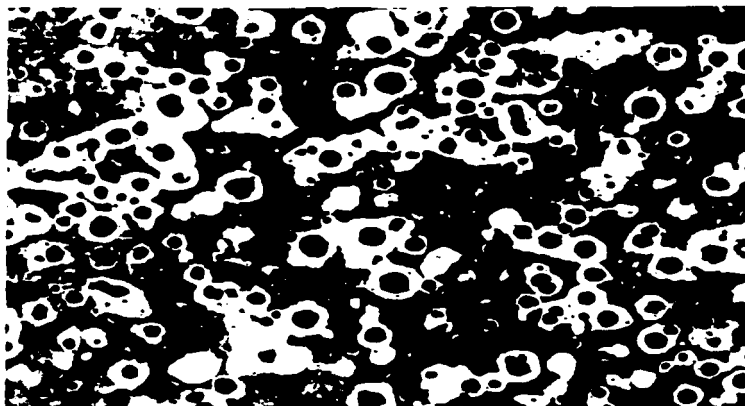


Foto 30. Prueba dos. Muestra de hierro con adición de 0.06% de magnesio, atacada con nital 3, matriz perlita-ferrita, a 100X

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

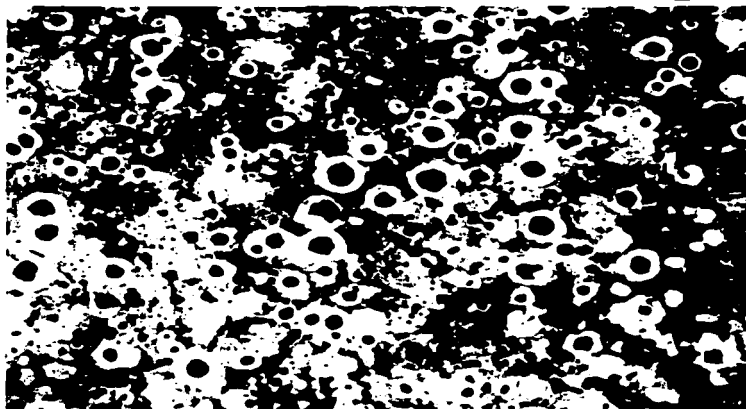


Foto 31. Prueba uno. Muestra de hierro con adición de 0.07% de magnesio, atacada con nital 3, matriz perlita-ferrita, a 100X.



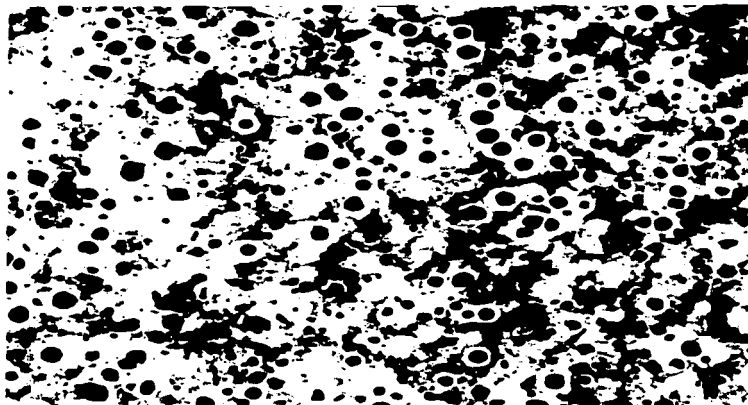


Foto 32. Prueba dos. Muestra de hierro con adición de 0.07% de magnesio, atacada con nital 3, matriz perlita-ferrita, a 100X.

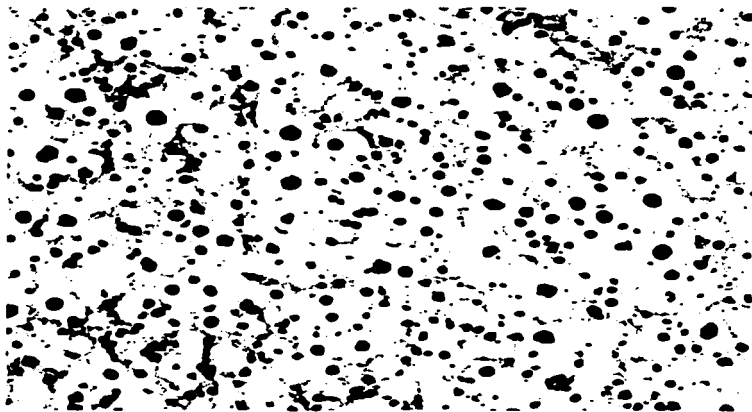


Foto 33. Prueba uno. Muestra de hierro con adición de 0.08% de magnesio, atacada con nital 3, matriz perlita-ferrita, a 100X.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

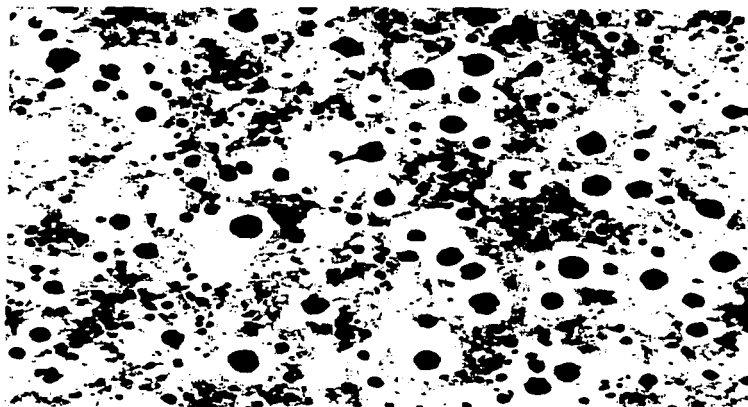


Foto 34. Prueba dos. Muestra de hierro con adición de 0.08% de magnesio, atacada con nital 3, matriz perlita-ferrita, a 100X.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

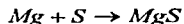
### 5.3 DISCUSIÓN.

Es importante de señalar que la temperatura de trabajo a nivel industrial oscila entre 1450-1500 °C, en este trabajo se reporta que la temperatura de trabajo se encuentra en el intervalo de 1650-1665 °C, el hecho de porque se estableció esta temperatura resulta más que nada del volumen o capacidad del convertidor, al tener un volumen pequeño y tomando como consideración el tiempo total de permanencia del metal líquido en el convertidor (225-250 segundos), se corría el riesgo de que el metal solidificara antes de vaciar a los moldes, es por ello que se efectuaron varias pruebas para determinar la temperatura de trabajo llegando a la conclusión que esta temperatura debería de estar en el rango de 1650-1665 °C.

El ángulo de giro del convertidor (125 grados) se determinó en base a la simulación realizada con el diseño de acrílico, el cual esta en función de atrapar el nodulizante en el fondo de la cámara de reacción (segunda cámara) cuando se realiza el giro, sin que éste logre estar en contacto con la atmósfera (aire) que se encuentre en el convertidor.

En el caso del tiempo de la reacción del nodulizante (Fe-Si-5%Mg) con el metal líquido, las industrias que fabrican este tipo de hierro (nodular) tienden a darle aproximadamente entre 40 a 50 segundos, para este trabajo se determinó que este es de 50 a 70 segundos, debido a que el nodulizante no termina de reaccionar en el tiempo establecido por algunas industrias, las razones principales son debido a que el tamaño del nodulizante contenido en el convertidor es grande y por tal motivo tarda más tiempo su disolución, además el nodulizante tiene una menor densidad que el metal líquido y que a pesar del ángulo de inclinación que se le da al convertidor para el tratamiento, comienza a moverse (debido a la reacción) de tal forma que no se logra contener algunas partículas en el fondo de la cámara de reacción.

Para los cálculos de las cantidades de ferro aleación (Fe-Si-5%Mg) que se agregan para el tratamiento de nodularización, fue importante considerar el porcentaje de azufre que aportan las chatarras (materias primas) ya que en su gran mayoría el azufre reacciona con el magnesio de tal manera que la relación estequiométrica entre ambos elementos es uno a uno (1:1), es decir, una mol de azufre se combina con una mol de magnesio para formar sulfuro de magnesio, esto esta representado por la siguiente reacción química:



Esto implica que entre mayor sea el porcentaje de azufre aportado por las chatarras, entonces la cantidad de ferro aleación que se tiene que agregar para el tratamiento de nodularización va a incrementarse.

Cuando se habla de adición de porcentaje de magnesio en el presente trabajo, se refiere a la cantidad de magnesio que se requiere para dicho nivel y esta cantidad esta relacionada con la capacidad del convertidor, es decir, la cantidad de metal líquido contenido en el convertidor que en muchos casos es de 18 y 17 kilogramos. Por otra parte se tiene que considerar la cantidad de magnesio que reacciona con el azufre presente en el metal líquido, de tal manera que la cantidad de magnesio total a agregar es la suma del magnesio que se requiere para la reacción con el azufre más el porcentaje de adición de magnesio que se establece con anterioridad.

Análisis de resultados del tamaño de grafito.

El tamaño de grafito en todas las muestras de hierro con adición de los diferentes niveles de magnesio (a excepción de la muestra de hierro con adición de 0.01% de magnesio) oscila entre tamaño de grafito clase 5, 6 y 7 (8, 4 y 2 mm respectivamente), para evaluar el tamaño de grafito y de acuerdo con los patrones de referencia, se tienen que observar las muestras a 100X y sin ataque.

Análisis con respecto al grafito precipitado.

El análisis metalográfico revela que el hierro obtenido para la muestra con adición de 0.01% de magnesio, es un hierro gris con matriz perlita-ferrita con hojuela tipo "C", claramente se observan placas de gran espesor y placas finas. La explicación del porque se obtuvo este tipo de grafito radica principalmente en el carbono equivalente el cual esta en función de la composición química. De manera general si la composición química final indica que es un hierro gris hipoeutéctico el tipo de grafito que precipita por lo general es de tipo "A", en caso contrario, si se trata de un hierro gris hipereutéctico el carbono libre precipita como tipo "C". El análisis de la composición química para esta muestra es:

	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Mg
Corrida 1	3.655	2.241	0.709	0.0194	0.0156	0.0069

Por lo que su carbono equivalente es:

$$CE = \%C + 1/3 * (\%Si + \%P) = 3.655 + 1/3 * (2.241 + 0.0194)$$

$$CE = 4.408 \%$$

Esto nos indica que la muestra es un hierro gris hipereutéctico y por lo tanto el tipo de grafito es "C", ya que de acuerdo con el diagrama de fases Fe-Cg, el eutéctico se encuentra en 4.3% de carbono.

Para la muestra de hierro con adición de 0.02% de magnesio se presenta un hierro nodular y de acuerdo al contenido de azufre que presenta es poco, reduciendo de manera drástica la cantidad de magnesio total. En las corridas de las muestras de hierro con adición de 0.03% y 0.04% en especial la corrida uno, el carbono grafito que precipito se encuentra en la transición de vermicular a nodular. Para los demás niveles de adición de magnesio (0.05, 0.06, 0.07 y 0.08%) y para las diferentes corridas el carbono grafito precipito en forma de esferoide.

Análisis del tipo de matriz.

De acuerdo al análisis metalográfico realizado a las muestras de hierro con diferentes niveles de magnesio que se trabajaron, todas presentan una matriz perlítica-ferrítica, únicamente varía el porcentaje de dicha matriz. Cabe señalar que cuando se efectuaron las primeras pruebas con el convertidor de doble cámara, el análisis metalográfico de las piezas fabricadas presento en todas las muestras una matriz que a parte de tener perlita y ferrita, también presenta cementita ( $Fe_3C$ ) y esto principalmente fue que no se efectuó la post inoculación, es decir, no se generaron los suficientes núcleos para evitar que el sobreenfriamiento fuera menor.

Todas las muestras de hierro presentan un tipo de matriz perlita-ferrita, esto se justifica en la composición química final principalmente considerando el porcentaje de manganeso ya que es el que define el tipo de matriz, en todas las muestras el porcentaje de manganeso final oscila por encima del 0.07% de tal manera que el tipo de matriz se confirma con la metalografía (ver fotografías con ataque a diferentes aumentos).

Análisis de las eficiencias.

Comparando el porcentaje de eficiencias (rendimientos) del magnesio en el convertidor de doble cámara se observa que la gran mayoría se encuentra cercanas al 50% y esto es debido principalmente que una parte del magnesio que se encuentra en el nodulizante se volatiliza debido a su bajo punto de ebullición del mismo y otra parte del magnesio actúa como desoxidante, es decir, se forma el óxido de magnesio ( $MgO$ ) el cual por lo general se encuentra en la escoria, esto quiere decir y de acuerdo a los resultados que el otro 50% se pierde por estas dos razones.

## VI CONCLUSIONES.

Con el desarrollo de este trabajo y de acuerdo con los análisis de los resultados obtenidos las conclusiones a las que se llegan son:

1. Mediante el método del convertidor de doble cámara y el empleo de Fe-Si-5%Mg se logra obtener hierro nodular.
2. La inoculación y post inoculación son factores importantes, ya que ambas abaten el sobreenfriamiento y además se logra evitar que la cementita ( $Fe_3C$ ) se forme durante la solidificación.
3. El tipo de matriz que se genere en las muestras de hierro con los diferentes niveles de adición de magnesio es perlita-ferrita, predominando más la perlita (el promedio se encuentra por encima del 80% perlita y 20% de ferrita).
4. El porcentaje de las eficiencias del magnesio sin considerar la reacción del magnesio con el azufre en el convertidor son mayores a las eficiencias del magnesio que consideran la reacción.
5. El porcentaje de eficiencia del magnesio (considerando la reacción con el azufre) contenido en el nodulizante empleando el convertidor de doble cámara se encuentra por lo general por debajo del 50%.
6. La cantidad de magnesio total para la obtención del hierro nodular esta en función del contenido de azufre presente en el metal líquido.
7. Con una post inoculación de 0.1% de silicio, se evita la formación de carburos (cementita).

## VII RECOMENDACIONES.

Durante el desarrollo del presente trabajo y para trabajos posteriores con el convertidor de doble cámara, se recomienda realizar lo siguiente:

1. Realizar un nuevo diseño del convertidor de doble cámara con mayor capacidad con el objetivo principal de lograr disminuir la temperatura de trabajo y esto a su vez mejore las eficiencias de los elementos de aleación.
2. Los accesorios del convertidor deben ser modificados, principalmente el dispositivo que se utiliza para sellar la entrada del nodulizante e inoculante y salida del metal líquido del convertidor hacia moldes, de esta forma se lograría reducir el tiempo de permanencia del metal líquido en el convertidor.
3. Efectuar pruebas de nodularización utilizando nodulizantes con diferente contenido de magnesio y a la vez con diferente tamaño de partícula..
4. Tratar de mantener el porcentaje de azufre del metal líquido por debajo del 0.02%, para evitar el gasto de grandes cantidades de nodulizante.
5. Si es posible trabajar con la misma materia prima primaria (chatarras), materias primas secundarias o de ajuste (ferro alcaiones, recarburantes), técnica de fusión y contemplar siempre el mismo nivel de inoculación, esto con el fin de modificar únicamente los niveles de adición de magnesio y lograr realizar un análisis más detallado de los resultados obtenidos.
6. Realizar un estudio más detallado y enfocado al transporte de calor que se genera durante el tratamiento de nodularización enfocado sobre todo en el tipo de refractario y lograr generar un modelo matemático que involucre las pérdidas o ganancias de calor durante la reacción que se genera entre el azufre y el magnesio.

**BIBLIOGRAFÍA.**

1. John A. Lewensky; "*Timeline of Ductile Iron History*", Modern Casting, october 1998, pp 48-51.
2. "*31 Census of World Casting Production-1996*", Modern Casting, december 1997, pp 40-41.
3. "*32 Census of World Casting Production-1997*", Modern Casting, december 1998, pp 54-55.
4. "*33 Census of World Casting Production-1998*", Modern Casting, december 1999, pp 40-41.
5. "*34 Census of World Casting Production-1999*", Modern Casting, december 2000, pp 30-31.
6. "*35 Census of World Casting Production-2000*", Modern Casting, december 2001, pp 38-39.
7. "*Ductile Iron Handbook*", American Foundrymen's Society, Ed. AFS, USA 1992, pp 1-19
8. A. De Sy, J. Vidts; "*Fonderie Belge*", No. 3, 1952, pp 41
9. M. Maruyama, "*The influence of SiO<sub>2</sub> on the Formation of Spheroidal Graphite in Cast Iron*", 30<sup>th</sup> International Foundry Congress, CIATF, Prague, 1963.
10. S. I. Karsay, "*Hypothetical Considerations on the Role of Phase Boundaries During Graphitization*", Recent Research on Cast Iron, ed. H. D. Merchant, Gordon and Breach, New York, 1968, pp 215-224.
11. S. I. Karsay, *Ductile Iron Production Practices*, AFS, Des Plaines, 1985.
12. American Foundrymen's Society Inc.; *Ductile Iron Handbook*, Ed. AFS, USA 1992, pp 1-19.

13. Jiyang, W. & Schimitz, S.; "*Formation of Austenite Shell Around Nodular Graphite and its Effect on Deterioration of Graphite*"; AFS Transactions, Vol 23, 1990, pp 783-786.
14. Lux, F. & Mollard, I.; "*On the Formation of Envelopes Around Graphite in Cast Iron*"; The metallurgy of Cast Iron, Editores B. Lux et al., Switzerland, 1975, pp 371-401.
15. Loper, Carl R., "*The Origin Of Ductile Iron*", Foundry M&T, November 1994, pp 32-34.
16. Hans, J. H., "*Comparing Seven Methods for Producing Ductile Iron*", Foundry M&T, August, 1987, pp 38-41.
17. Mohla, Prem P., "*New Ductile Iron Process Meets The Challenge of the 1990's*", Foundry M&T, April 1993, pp 52-56.
18. Forshey, T. L. & Loper, C. R., "*Modification and Production Experience with the Tundish Cover for Ductile Iron Treatment*", AFS Transactions, Vol 33, 1982, pp 53-57.
19. Anderson, D. Benn., "*Covered Treatment Ladle for the Production of Ductile Iron*", AFS Transactions, Vol. 145, 1982, pp 159-165.
20. Alagarsamy, A., "*Ductile Iron Treatment Using Pure Mg in a Modified Tundish Ladle*", AFS Transactions, Vol. 40, 1992, pp 235-238.
21. Hachtman, Robert L., "*Kulp Foundry Finding Success with Ductile Iron*", Modern Casting, October, 1983, pp 24-27.
22. Brewster, W. D., "*Survey on Ductile Iron Practice in U. S.*", Modern Casting, June, 1989, pp 39-42.
23. Hans, J. H., "*Desulfurizing and Treating Ductile Iron part II*", Foundry M&T, October, 1985, pp 54-57.



24. Navarro López, José; "*Proceso FLOTRET para la fabricación de Hierro Nodular*", Moldeo y fundición, No 49, 1987, pp 8-14.
25. Dieter H. Gumbinger & Michael Korff, "*Mg Wire Treatment of Ductile Iron*", Modern Casting, February, 1988, pp. 40-41.
26. Rotella, J. & Mickelson, R., "*Using Cored Wire in the production of Ductile Iron*", AFS Transactions, Vol. 69, 1991, pp 519-523.
27. Kirginn, Kenneth H., "*Ductile Iron to Spur Ferrous Casting Recovery*", Modern Casting, January, 1993, pp 26-28.
28. Peng, Y. & Yang M., "*Influence of In the Mold Chamber Design on Dross Formation in Ductile Iron Casting*", AFS transactions, Vol. 173, 1987, pp 653-664.
29. Prucha, Thomas E., "*Gating for the In-the-Mold Process*", Modern Casting, February, 1982, pp 38-42.
30. Cervantes Islas, J., "*Producción del Hierro Nodular en el convertidor Fischer*", Moldeo y Fundición, Vol. 32, 1988, pp 8-18.
31. Brewster, W. D. & Foltz, J. E., "*Survey on Ductile Iron Practice*", AFS Transactions, Vol. 59, 1989, pp 80-84.
32. Karsay, Stephen I., "*Fundición con grafito esférico*", Ed. Qit-Fer ct Titanc Inc., Montreal, P.Q., Canadá, 1976, pp 3-5.
33. Liu, S. L. & N. X. Ding, "*effect of type and Amount of Treatment Alloy on Compacted Graphite Produced by Flotret Process*", AFS Transactions, Vol. 99, 1985, pp 675-650.
34. Weese, P.P. Mohla, "*In-the-Mold Process Innovations: A Case History*", AFS Transactions, Vol. 103, 1995, pp. 15-19.

35. Fowler, J. & Stefanescu, D. M., "*Production of Ferritic and Perlitic Grades of Compacted Graphite Cast Iron by the In-Mold Process*", AFS Transactions, Vol. 60, 1984, pp. 361-372.
36. Dunks, C. M., "*In the Mold Worldwide Today and Tomorrow*", AFS Transactions, Vol. 83, 1982, pp. 551-556.
37. Davis, K. G. & Ding H., "*In-Mold Production of ductile Iron In Permanent Moulds*", Advanced Casting Technology, ASM International, USA, 1986, pp. 221-230.

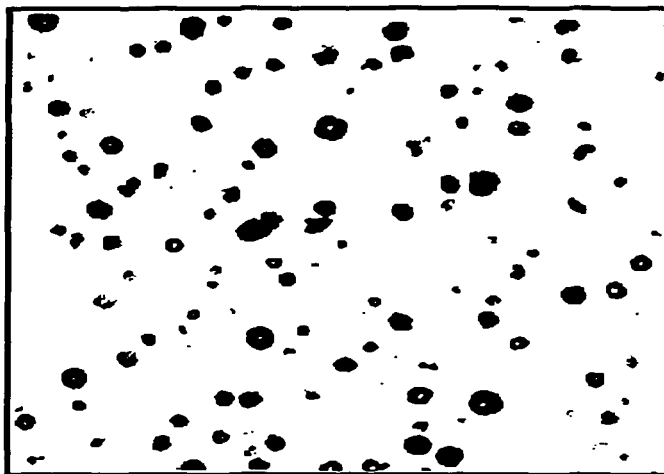
**APÉNDICE A**

Sección 1: Caracterización del grafito.  
A) Porcentaje de nodularidad  
B) Tamaño de nódulo.  
C) Densidad.

Sección 2: Estructura de la matriz.  
A) Porcentaje de perlita.

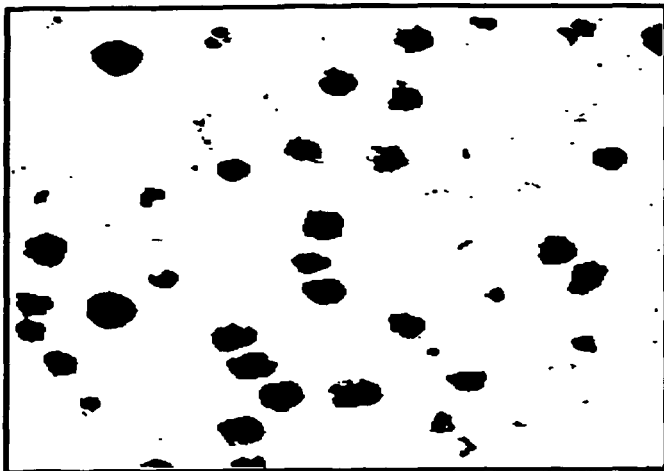
**PORCENTAJE DE NODULARIDAD.**

*(SECCIÓN 1)*

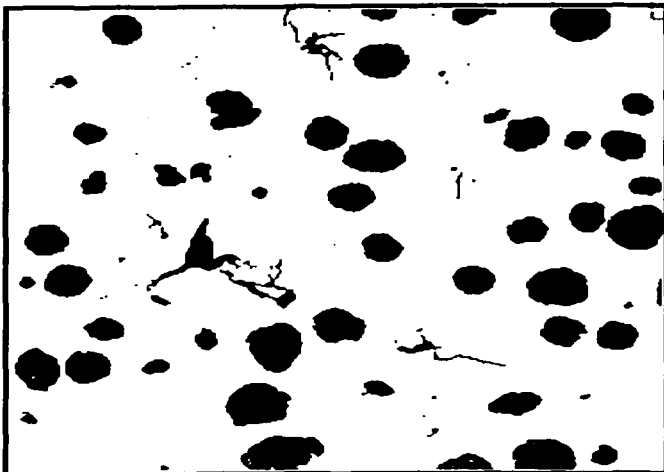


100%

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

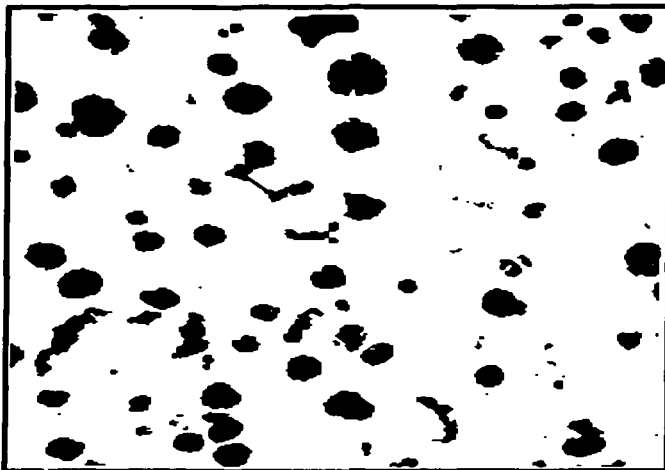


90%

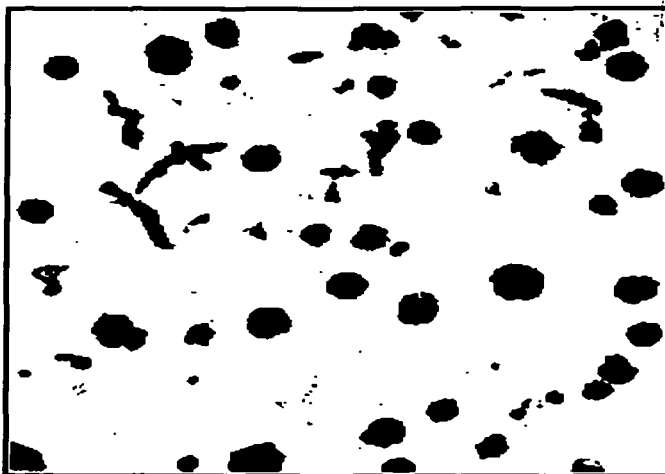


80%

TESIS  
FALLA DE ORIGEN

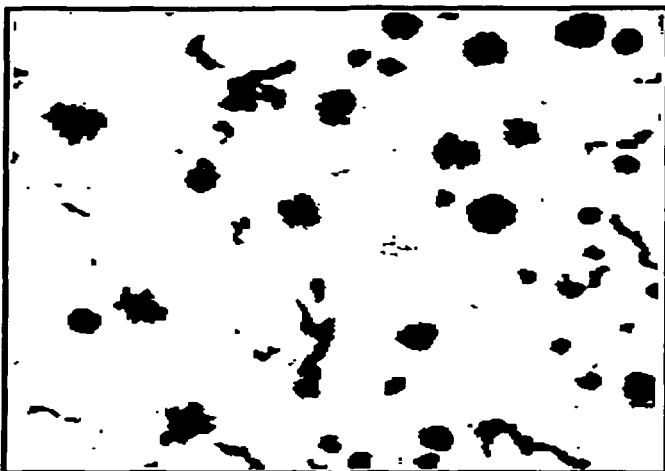


80%

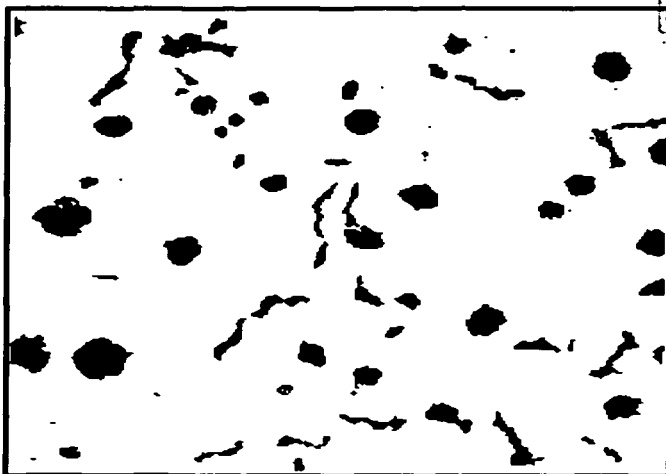


70%

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



60%



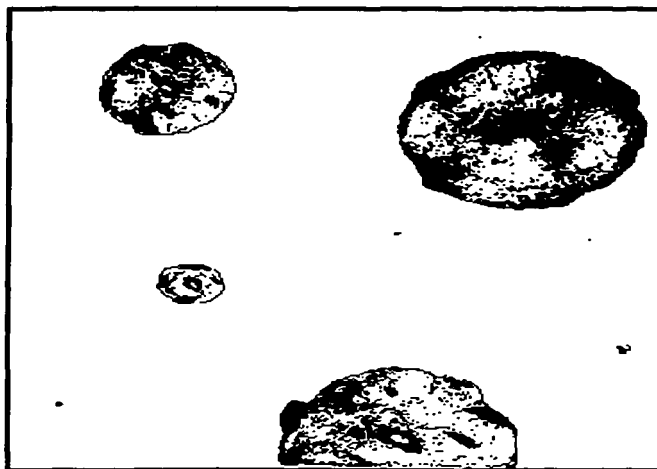
50%

TESIS CON  
FALLA DE CRUCEN

### TAMAÑO DE NÓDULO

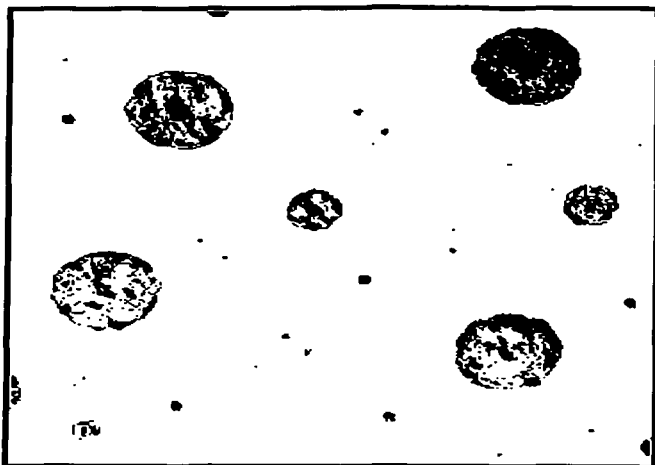
En esta serie de fotografías se muestran los posibles tamaños de nódulo en el hierro dúctil y son representados a 100x, sin ataque. Serie tomada de la norma ASTM especificación A 247-267 (1978)

Clase de tamaño	Dimensión máxima a 100x mm <sup>2</sup>
1	128
2	64
3	32
4	16
5	8
6	4
7	2
8	1

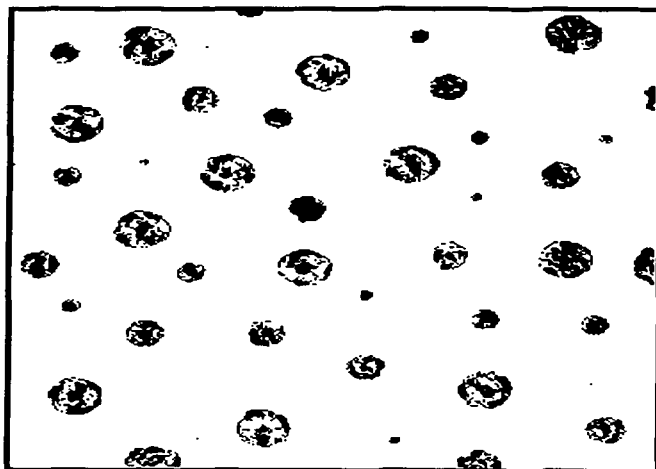


Tamaño 3.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



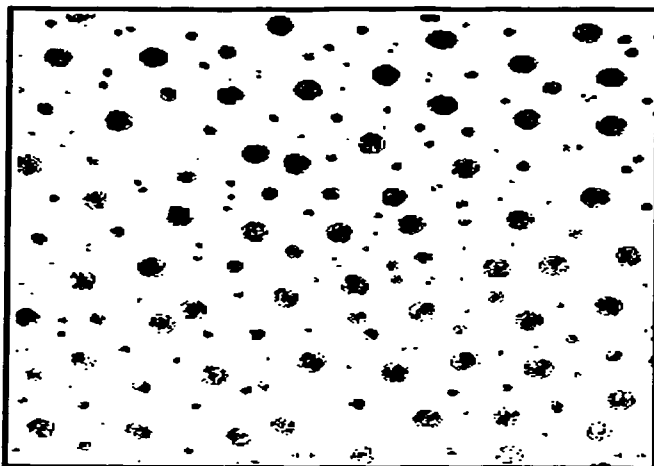
Tamaño 4.



Tamaño 5.

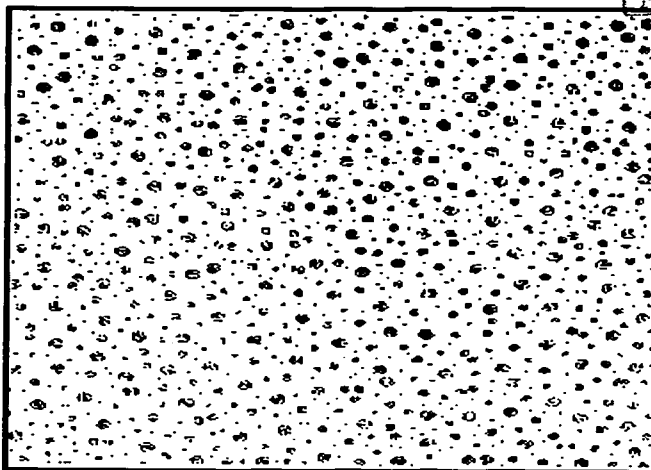
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



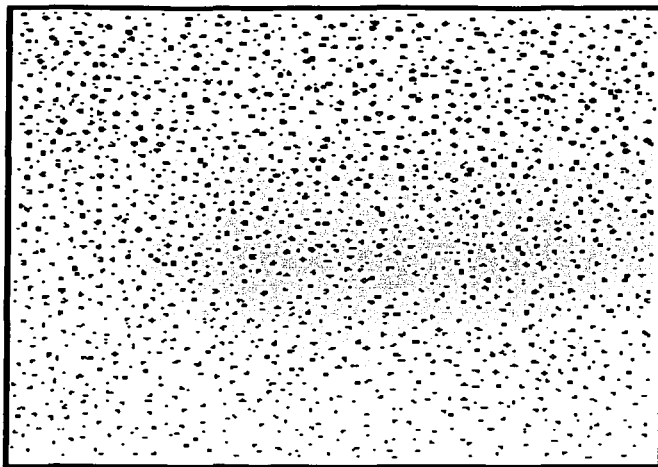


Tamaño 6.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Tamaño 7.

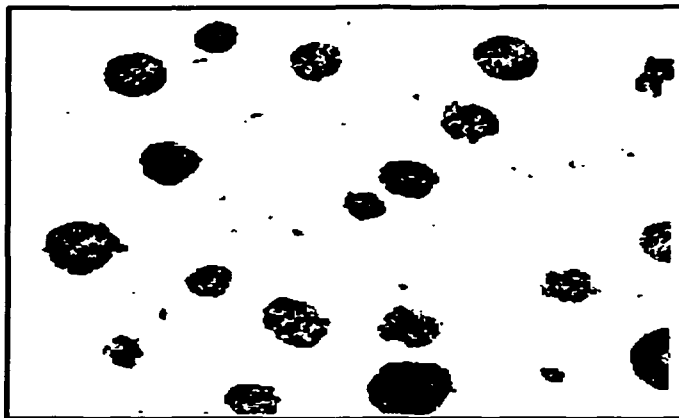


Tamaño 8.

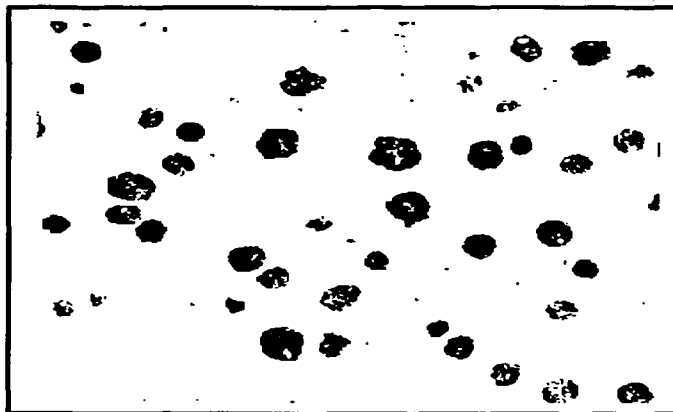
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

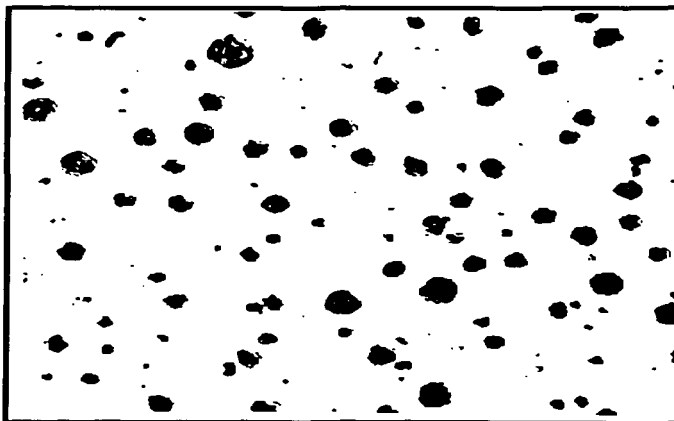
**DENSIDAD**

La siguiente serie de fotografías muestra la distribución de los nódulos de carbono grafito por cada  $\text{mm}^2$ , dichas fotografías están representadas a 100x.

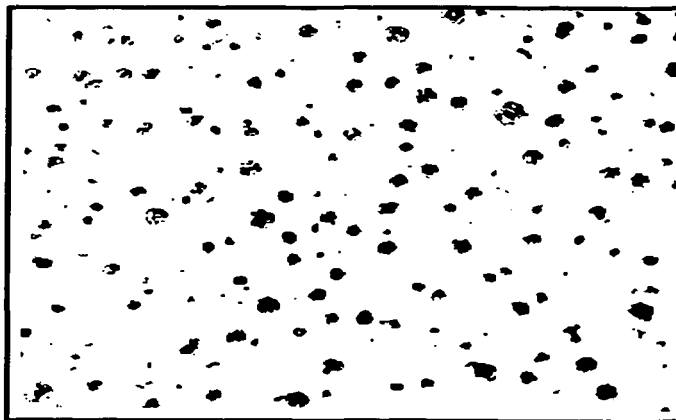
25 nódulos/ $\text{mm}^2$ .

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

50 nódulos/ $\text{mm}^2$ .

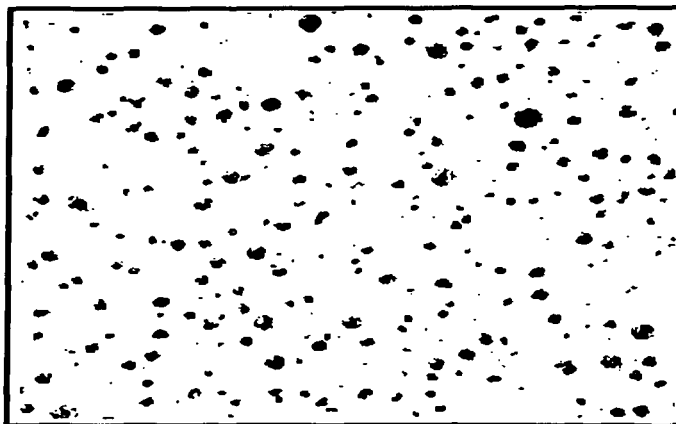


100 nódulos/mm<sup>2</sup>.



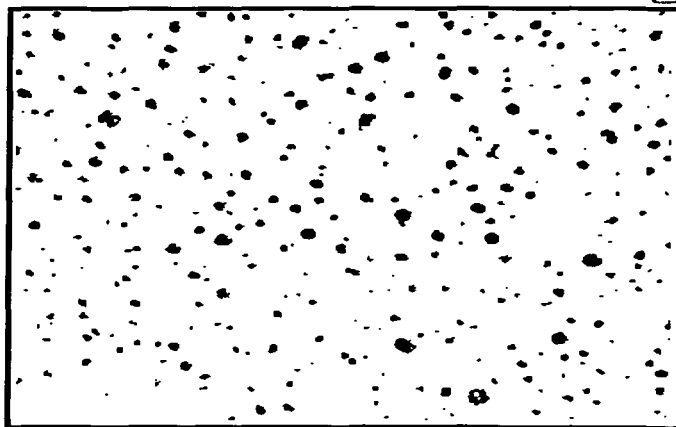
150 nódulos/mm<sup>2</sup>.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

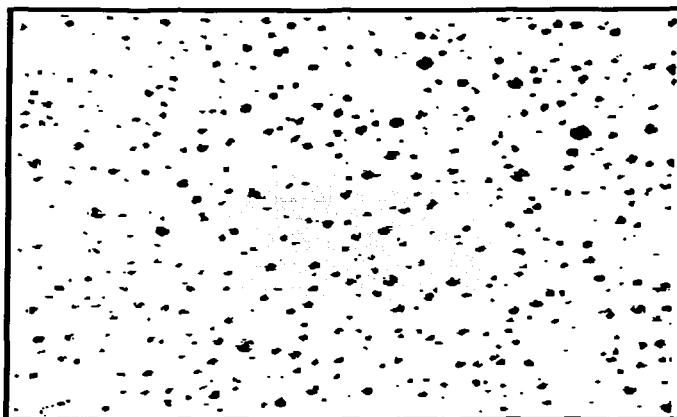


200 nódulos/mm<sup>2</sup>.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



250 nódulos/mm<sup>2</sup>.



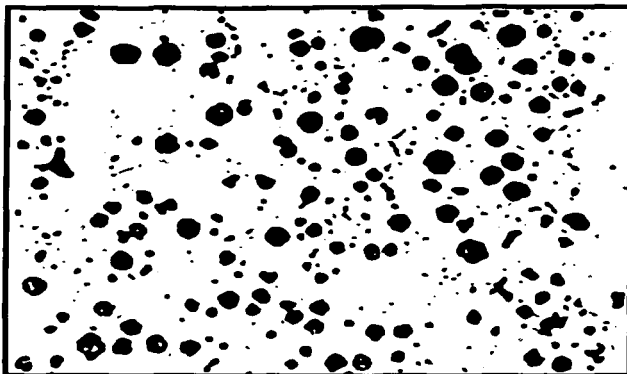
300 nódulos/mm<sup>2</sup>.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**TIPO DE MATRIZ**

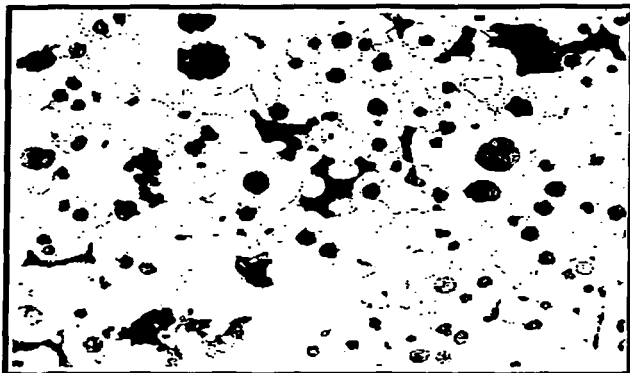
La siguiente serie de fotografías muestra los diferentes porcentajes que constituyen a la matriz de un hierro dúctil, dichas fotografías están representadas a 100x.

*(SECCIÓN II)*



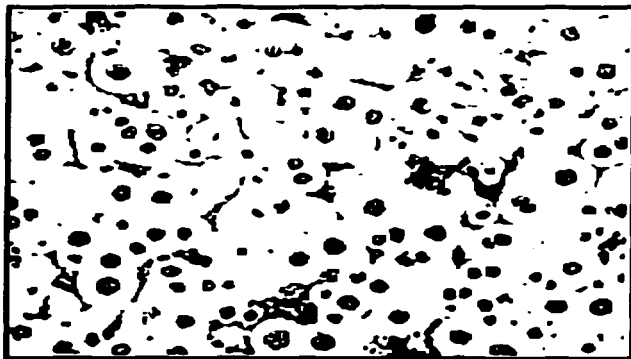
**Matriz completamente ferrítica.**

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



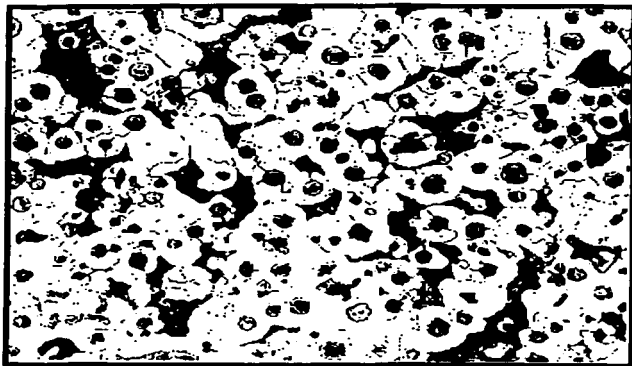
5 % perlita - 95 % ferrita.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



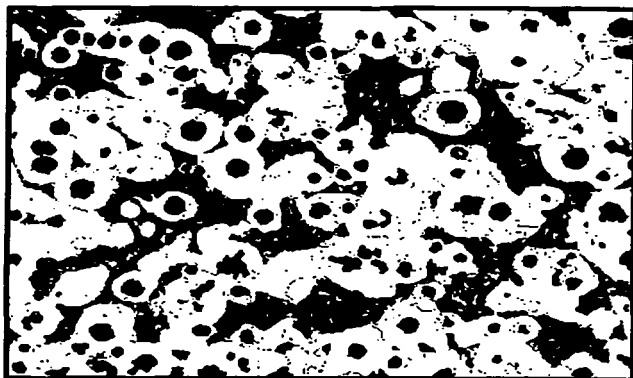
10 % perlita - 90 % ferrita



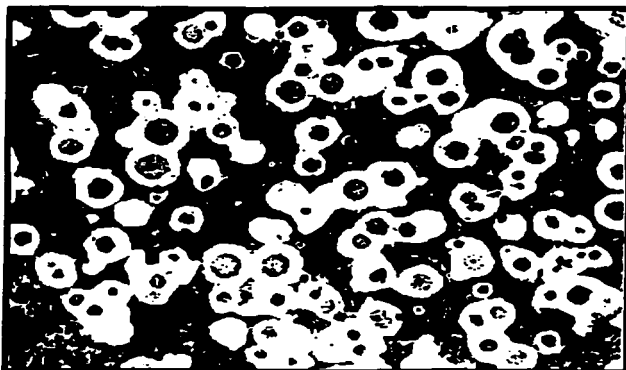


15 % perlita – 85 % ferrita.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

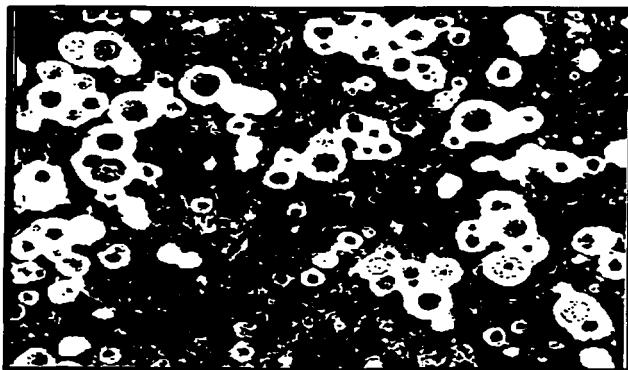


25 % perlita – 75 % ferrita.

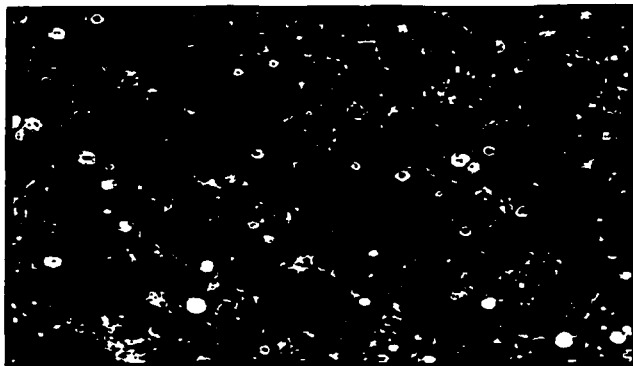


50 % perlita - 50 % ferrita.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



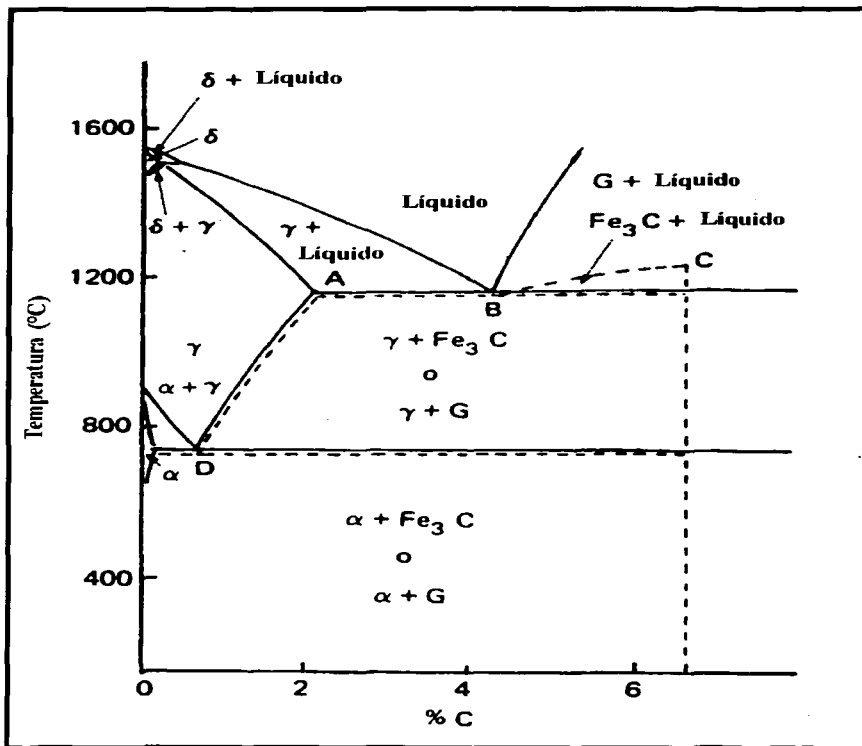
75 % perlita - 25 % ferrita.



**Matriz completamente perlítica.**

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**APENDICE B**  
**DIAGRAMA DE FASE HIERRO-CARBONO.**



Temperaturas y composiciones para los diferentes puntos del diagrama de fases:

	A	B	C	D	
( — ) Fe-C <sub>g</sub>	2.09	4.25		0.68	%C
	1154	1154		739	T(°C)
( - - - ) Fe-Fe <sub>3</sub> C	2.12	4.31	6.68	0.76	%C
	1148	1148	1226	727	T(°C)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN