



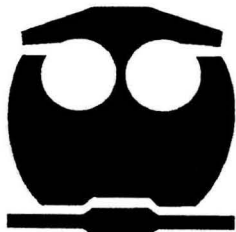
# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

## FACULTAD DE QUÍMICA

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN  
CONVERTIDOR DE DOBLE CÁMARA PARA LA  
FABRICACIÓN DE HIERRO VERMICULAR

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO  
P R E S E N T A :  
VÍCTOR GUADARRAMA GÓMEZ



MÉXICO, D.F.

EXAMENES PROFESIONALES  
FACULTAD DE QUÍMICA

2004



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**

**Tesis Digitales**

**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**

**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



JURADO ASIGNADO:

|              |                                           |
|--------------|-------------------------------------------|
| PRESIDENTE   | PROF. EUSEBIO CÁNDIDO ATLATENCO TLAPANCO. |
| VOCAL        | PROF. ANTONIO HUERTA CERDÁN.              |
| SECRETARIO   | PROF. ADRIÁN MANUEL AMARO VILLEDA.        |
| 1ER SUPLENTE | PROF. SERGIO GARCÍA GALÁN.                |
| 2º. SUPLENTE | PROF. VERÓNICA MARTÍNEZ FLORES.           |

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA

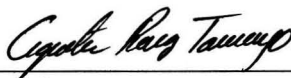
LABORATORIO DE FUNDICIÓN Y MOLDEO, LABORATORIO DE METALOGRAFÍA.  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA.  
FACULTAD DE QUÍMICA, EDIFICIO "D"; CIUDAD UNIVERSITARIA, UNAM.

ASESOR DEL TEMA:



ADRIÁN MANUEL AMARO VILLEDA.

SUPERVISOR TÉCNICO:



AGUSTÍN GERARDO RUIZ TAMAYO.

SUSTENTANTE



VÍCTOR GUADARRAMA GÓMEZ.

## **AGRADECIMIENTOS.**

A MI ASESOR DE TEMA:

I.Q.M. Adrián Manuel Amaro Villeda por la paciencia, el apoyo, la confianza, los consejos brindados y su sincera amistad.

A MI SUPERVISOR TÉCNICO:

I.Q.M Agustín Gerardo Ruiz Tamayo. Por su gran apoyo y por las fundiciones a la alborada que realizamos.

A EL I.Q.M EUSEBIO CÁNDIDO ATLATENCO TLAPANCO, POR SU APOYO Y EL LANZAMIENTO DE METAL LÍQUIDO.

PARA MIS PROFESORES:

Dr. Carlos González Rivera, Dr. Alejandro García Hinojosa, M en C. Antonio Huerta Cerdán, I.Q.M. Ignacio Beltrán Piña, Dr. Antonio Barrera, Dra. Kira Padilla, Sergio Galán, Vicente Turrubiarte:

Por todo su apoyo, sus enseñanzas, consejos y buenos momentos...

A TODOS MIS COMPAÑEROS Y AMIGOS QUE HICIERON POSIBLE ESTE PROYECTO:

Humberto Cabrera, Armando García, Gabriela Falcón, Enna Arámbula, David Muñoz, Darío Escobar, Agustín Ruiz, Guillermo Zavala, Luis Villaverde, Erika Villagrana, Rafael, Verónica Varela, Alejandra López, Raymundo Sánchez, Iván Muñoz, Jorge Islas, Andrés Hernández.

A todos y a cada uno gracias...

A la Universidad Nacional Autónoma de México, a mi preparatoria (Plantel 9) y a la Facultad de Química porque es un privilegio ser universitario.

## **DEDICATORIAS.**

A mi madre Rosa Lila Gómez Ricárdez por su apoyo incondicional, sus enseñanzas de vida y por su infinito amor soy quien soy. TE AMO!

A mi Padre Víctor Guadarrama Granados quien fue mi inspiración para seguir adelante; y donde quiera que estés te recuerdo con mucho cariño...

A mi hermana Angélica Guadarrama Gómez, regalo que la vida me ha dado, sabes que siempre podrás contar conmigo.

A mi abuelita Nini, quien siempre ha velado por mí...

A César Torrijos Gamboa: hermano, sin mi la vida no sería la misma, no crees ???

A mis tías y tíos Elena, Nora, Hugo y César su apoyo a sido pilar fundamental en mi desarrollo personal y profesional.

A mis Amigos: Humberto, Janet, Armando, Gabriela, Enna, Rubén, Carolina, Valeria, Efraín, Ricardo, Jessica, Víctor M., ha sido un verdadero placer encontrarlos en esta vida...

Un especial agradecimiento a Humberto y Armando. Este trabajo también es suyo...

A mi flaquita adorada Paola Lozano, quien me ha acompañado a lo largo de mi vida universitaria, por ser el amor de mi vida y uno de los regalos más valiosos que la vida me ha dado. Gracias por todo...

## ÍNDICE.

|                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------|----|
| <b>INTRODUCCIÓN</b>                                             | 4  |
| <b>CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.</b>                        | 8  |
| <b>CAPÍTULO II. FABRICACIÓN DEL CONVERTIDOR DE DOBLE CÁMARA</b> | 33 |
| 2.1 MODELOS A ESCALA.                                           | 34 |
| 2.2 DIMENSIONES DEL CONVERTIDOR DE DOBLE CÁMARA.                | 36 |
| 2.3 FABRICACIÓN DEL CAPARAZÓN DEL CONVERTIDOR.                  | 37 |
| 2.4 FABRICACIÓN DE LA TAPA DEL CONVERTIDOR.                     | 38 |
| 2.6 MANERALES DEL CONVERTIDOR.                                  | 40 |
| 2.6 INCORPORACIÓN DEL REFRACTARIO.                              | 41 |
| 2.7 ADITAMENTOS DEL CONVERTIDOR Y TAPAS.                        | 43 |
| 2.8 QUEMADOR DE DOBLE SALIDA.                                   | 45 |
| 2.9 SINTERIZADO DEL CONVERTIDOR DE DOBLE CÁMARA.                | 46 |
| 2.10 ENSAMBLE DEL CONVERTIDOR DE DOBLE CÁMARA                   | 47 |
| <b>CAPÍTULO III. ENTORNO DE PROGRAMACIÓN</b>                    | 49 |
| 3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA MÓDULOS DE ENFRIAMIENTO.           | 49 |
| 3.2 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA PROJECT GGV25                      | 51 |
| <b>CAPÍTULO IV. DESARROLLO EXPERIMENTAL.</b>                    | 62 |
| 4.1 MATERIAL Y EQUIPO                                           | 62 |
| 4.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA.                                        | 65 |
| 4.2.1 Balance de Carga                                          | 65 |
| 4.3 TÉCNICA DE FUSIÓN.                                          | 75 |
| 4.3.1 Etapa 1: Materia Prima y Moldes.                          | 77 |
| 4.3.1.1 Preparación de materia prima.                           | 77 |
| 4.3.1.2 Fabricación de moldes de arena.                         | 78 |
| 4.3.2 Etapa 2: Fusión.                                          | 79 |

|                                                         |            |
|---------------------------------------------------------|------------|
| 4.3.2.1 Secuencia de Carga.                             | 79         |
| 4.3.2.2 Calibración y Preparación.                      | 80         |
| 4.3.2.3 Horno (Metal líquido).                          | 82         |
| 4.3.2.4 Limpieza del metal líquido.                     | 82         |
| 4.3.2.5 Molde Para análisis químico.                    | 82         |
| 4.3.2.6 Preparación de la moneda para análisis químico. | 83         |
| 4.3.2.7 Espectrómetro de Chispa.                        | 83         |
| 4.3.2.8 Software Project GGV25.                         | 84         |
| 4.3.2.9 Balanza Analítica.                              | 85         |
| 4.3.2.10 Medición de Temperatura                        | 85         |
| 4.3.2.11 Precalentamiento del convertidor.              | 86         |
| 4.3.3 Etapa 3: Colada.                                  | 87         |
| 4.3.3.1 Suspensión del calentamiento del convertidor.   | 87         |
| 4.3.3.2 Ingreso del metal líquido al convertidor.       | 88         |
| 4.3.3.3 Sellado de las cámaras.                         | 89         |
| 4.3.3.4 Reacción.                                       | 89         |
| 4.3.3.5 Post-reacción.                                  | 90         |
| 4.3.3.6 Post-Inoculación.                               | 90         |
| 4.3.3.7 Colada de Barras.                               | 91         |
| 4.3.3.8 Fabricación de monedas.                         | 91         |
| 4.3.3.9 Colada a moldes.                                | 92         |
| 4.3.3.10 Metalografía                                   | 92         |
| <b>CAPÍTULO V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.</b>              | <b>94</b>  |
| 5.1 COMPOSICIÓN QUÍMICA                                 | 94         |
| 5.2 EFICIENCIA EFECTIVA DEL MAGNESIO                    | 96         |
| 5.3 TEMPERATURAS DE COLADA .                            | 99         |
| 5.4 MICROESTRUCTURAS DE LOS HIERROS FABRICADOS.         | 99         |
| 5.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS                              | 113        |
| <b>CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES.</b>                       | <b>118</b> |

|                     |     |
|---------------------|-----|
| <b>BIBLIOGRAFÍA</b> | 119 |
| <b>APÉNDICE A</b>   | 122 |
| <b>APÉNDICE B</b>   | 133 |
| <b>APÉNDICE C</b>   | 135 |

## **INTRODUCCIÓN.** <sup>(1,3,19)</sup>

Aún cuando los hierros con grafito compacto (CGI) han existido por más de 40 años, sus aplicaciones han sido restringidas a las más simples, como por ejemplo ménsulas, carcasas de bombas neumáticas y ruedas con engranes. Recientemente la creciente demanda por mejorar el desempeño y los niveles de "poder-de-carga" en motores de gas y diesel han obligado a los fabricantes de automóviles y camiones a evaluar los CGI para las siguientes generaciones de monoblocks, cabezas de motor, balatas entre otros. Estas aplicaciones, sin embargo, requieren de un cambio en los procesos de la fundición capaces de producir CGI en volúmenes de producción elevados, complejidad geométrica, y tendencia de contracción elevada, especificaciones rigurosas de la microestructura y el riesgo de tolerancia para la colada fuera de especificación debe de ser nula.

Esta producción y los requerimientos de desempeño de auto partes (del motor) son la base para defender las especificaciones del producto. Para una adecuada colada, maquinabilidad y desempeño, un rango del 0% al 20% de nodularidad es requerido en secciones críticas. Aún más importante, el grafito en forma de hojuela debe ser evitado para prevenir debilidades locales que puedan resultar en una falla.

Para una óptima maquinabilidad, los carburos deben ser evitados y el titanio (Ti) (que es empleado para el control de la nodularidad) no debe ser utilizado. La fundición requiere un proceso confiable que minimice las impurezas metalúrgicas y los fabricantes requieren asegurar la calidad certificando que el 100% de las coladas satisfacen las especificaciones de microestructura. Confiables líneas de producción requieren precisos análisis químicos del metal líquido seguidos por un control on-line de acción para eliminar variaciones en el proceso antes de la colada.

Los hierros con grafito compacto han sido sujetos de considerables investigaciones durante la pasada década en donde el grafito compacto mantuvo un acelerado y creciente interés. Así mismo es necesario brindar constancia en la mejora de las técnicas de tratamientos, controles de proceso, evaluación de la microestructura, etc.

Numerosos estudios sobre la morfología del grafito compacto, han concluido en que el hierro vermicular es caracterizado por presentar una morfología "afilada-despuntada" hojuela gruesa la cual está interconectada en una estructura ramificada dentro de las celdas de grafito. La interconexión natural del grafito compacto tiene que ver directamente con su conductividad térmica y maquinabilidad. Lo ancho y redondeado del grafito compacto lo llevan hacia sus mejores propiedades mecánicas. Con estas altas propiedades, el CGI se ha encontrado atractivo para muchas aplicaciones industriales, particularmente en el ramo automotriz.

El CGI comparado con la producción de fundiciones grises y nodulares (por debajo de 12 mm) no es mayor problema. La alta velocidad de enfriamiento promueve la formación de carburos; sin embargo, este efecto puede ser eliminado a través de una adecuada inoculación. La estructura del grafito es definitivamente afectada, pero la forma del grafito es sustancialmente inalterada (grandes cantidades de nódulos cerca del borde en fundiciones dúctiles y grafito fino tipo D cerca de los bordes en fundiciones grises). En la producción de CGI los problemas son más complicados. Estos hierros no solo están sujetos a la formación de carburos por la rápida velocidad de las condiciones de enfriamiento, sino que las estructuras son afectadas significativamente por el sobre-tratamiento (grafito esferoidal) y el bajo-tratamiento (hojuelas de grafito).



Una adecuada calidad del grafito compacto ha sido producida usando aleaciones que contengan nodulizante y antinodulizantes, como el Mg-Ti ferrosilicio. Usando este método como tratamiento permite incrementar el rango de azufre presente en la carga (0.01-0.03%), así como los niveles para el tratamiento que con solo la utilización del Mg. Sin embargo, las estructuras en las secciones delgadas siguen siendo propensas a una elevada nodularidad, a menos que el Ti contenido sea eliminado considerablemente.

Las aleaciones de Cerio (Ce) han sido aplicadas satisfactoriamente en la producción de hierros CGI para secciones medianas y pesadas. Las tierras raras como tratamiento de nodulización tienden a disiparse más lentamente. Virtualmente todos los inoculantes son capaces de inducir un incremento de la cantidad de grafito compacto y/o nódulos. Se han realizado esfuerzos para tratar este problema modificando las aleaciones de tierras raras), o reemplazando completamente al Ce con La en la aleación. Incluso con estos intentos se tienen resultados limitados en secciones delgadas.

El convertidor de doble cámara fabricado en el presente trabajo intenta incrementar las eficiencias del Mg utilizado en el tratamiento de nodulización, así como obtener hierro con grafito compacto de alta calidad.

Para lograr lo anterior, se propone la utilización de un convertidor de doble cámara capaz de disminuir el contacto del metal líquido con el oxígeno promoviendo la nodulización del metal líquido.

Además y al igual que cualquier proceso de la fundición, es necesario establecer la técnica de fusión estandarizada, para lograr obtener resultados reproducibles y eliminar la incertidumbre de posibles variables no deseadas durante el proceso.

Así mismo, se incorporaron herramientas de cómputo las cuales pretenden mejorar el desempeño y precisión como es el caso particular de la composición química.

## **CAPITULO I**

### **1. FUNDAMENTOS TEORICOS.**

#### **TIPOS DE FUNDICIONES** (2,3,6,17,18)

La clasificación de las diferentes fundiciones se debe principalmente a la forma de grafito precipitado en la microestructura. La fundición blanca deriva su nombre por la apariencia y color de la superficie de fractura, la cual es blanca. Así también se le da el nombre a la fundición gris por el color de su fractura (gris), la fundición dúctil o nodular presenta una moderada ductilidad y el grafito se encuentra en forma de esferoides llamados también nódulos. La fundición vermicular deriva su nombre por la forma del grafito como vermiculos también conocido como hierro de grafito compacto (CGI) por sus siglas en inglés.

#### **COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS FUNDICIONES.**

##### **FUNDICIÓN BLANCA**

La fundición blanca se forma cuando el carbono, en solución en el metal fundido, no precipita en forma de grafito durante la solidificación siempre y cuando exista una combinación de C y Fe para formar carburos de hierro (cementita). Esto se debe principalmente al contenido de Si presente ya que es el promotor para que precipite el grafito, sin embargo si el contenido de Si es bajo no podrá precipitar, en consecuencia se tendrá una fundición blanca, esta fundición es muy dura y frágil, presenta una alta resistencia a la compresión, una buena retención de esfuerzos, una alta dureza a elevadas temperaturas. Sus usos más comunes se deben a su excelente resistencia al desgaste y a la abrasión. Estas propiedades son el resultado de la presencia de carburos contenidos en su microestructura.

## **FUNDICIÓN GRIS**

Cuando la composición química de la fundición (principalmente C y Si) y la velocidad de enfriamiento es adecuada, una porción sustancial del volumen de carbono tiende a precipitar en forma de hojuelas de grafito. Cuando una pieza de fundición gris se rompe, el desarrollo de la fractura sigue las hojuelas de grafito y la superficie de fractura es de color gris debido a la predominancia de grafito. Por lo tanto, la presencia de una considerable cantidad de Si hace que la grafitización sea posible, las diferentes formas, tamaños y distribuciones de las hojuelas de grafito en la solidificación de la fundición gris, tiene como consecuencia la clasificación de grafito adoptada por la AFS (American Foundrymen's Society).

La fundición gris tiene varias propiedades únicas derivadas de la existencia de hojuelas de grafito en la microestructura, este tipo de fundición puede ser maquinada fácilmente y presenta una elevada resistencia al desgaste, esta resistencia puede ser modificada bajo condiciones de lubricación y presenta excelentes propiedades donde se involucra la vibración de componentes.

## **FUNDICIÓN NODULAR**

La fundición nodular o dúctil también conocida como fundición grafiesferoidal, es muy similar a la fundición gris en composición, pero durante la solidificación de esta fundición, el grafito precipita en forma de partículas esféricas, esto es posible por la adición de pequeñas cantidades definidas de Mg, Ce y tierras raras al metal líquido, esta etapa es conocida como nodulización. La fundición dúctil presenta las mejores propiedades de la familia de las fundiciones coladas por ejemplo; bajo punto de fusión, buena fluidez, excelente maquinabilidad, alta ductilidad, etc.; por sus propiedades tiene un gran número de usos, como son: partes de

motores de vehículos, maquinaria para la industria del papel, para la combustión interna en automotores, compresoras, maquinaria para la construcción.

### **FUNDICIÓN VERMICULAR (CGI).** <sup>(1,2,3,6,11,17,18)</sup>

La fundición vermicular fue descubierta al final de los cuarentas, durante el desarrollo de la técnica de la producción nodular. Esto se realizó cuando el tratamiento con Mg fue insuficiente para establecer totalmente la forma de grafito esferoidal, y se obtuvo un grafito precipitado en forma de gusano o vermículo. Por muchos años esta forma de grafito compacto se presentó en la producción de hierros nodulares considerándola una falla de la producción, subsecuentemente se observó que las propiedades de este material tenían una excelente combinación de propiedades tanto mecánicas como físicas. Al saber de sus propiedades mecánicas en los años sesentas se optó por desarrollar técnicas de producción del CGI en respuesta a la demanda de materiales especiales para el diseño de mejores motores para la industria automotriz. Desafortunadamente la producción de CGI en el ámbito industrial no sucedió por que la microestructura es solamente estable en un nivel de 0.03% de Mg residual, de igual manera a principios de los años setentas y ochentas la producción de CGI fue infructuosa por lo cual se dice que la técnica de producción no era lo suficientemente reproducible para asegurar una alta calidad de fundición de grafito compacto.

El grafito compacto (CG) se caracteriza por estar interconectado como celdas eutécticas, similares a las hojuelas de grafito en la fundición gris, sin embargo, el grafito de la fundición vermicular es mas grueso y mas grande, la microestructura es intermedia entre la fundición gris y la nodular, sus

propiedades son superiores que las de los hierros grises e inferiores a las de la fundición nodular.

La fundición vermicular se obtiene controlando la cantidad de Mg adicionado al momento de nodulizar, este proceso es muy similar al utilizado para producir una fundición nodular, desafortunadamente cuando el proceso no se efectúa adecuadamente, por no controlar la cantidad de Mg, se obtiene fundición gris o fundición nodular. La producción de fundición con grafito compacto se logra por la nodularización con Mg, para dar un contenido residual de Mg de 50 a 600 ppm.

### **PROPIEDADES DE LA FUNDICIÓN VERMICULAR (CGI)**

Como es conocido, las propiedades físicas y mecánicas de este material dependen primordialmente de la forma del grafito formado durante la solidificación, por lo cual es fácil entender que las propiedades de la fundición vermicular (CGI) están entre las fundiciones gris y nodular por la forma del grafito, lo cual también significa que algunas propiedades pueden ser similares a la fundición gris y otras a la fundición nodular, por lo tanto la fundición vermicular se puede desarrollar para ciertas aplicaciones prácticas de propiedades como el esfuerzo de tensión, esfuerzo de fluencia, conductividad térmica, impacto, etc. La matriz puede ser ferrítica, perlítica o una mezcla de ambas como en la fundición gris y en la fundición nodular.

Dependiendo de la composición y la cantidad de perlita en la microestructura, el esfuerzo de tensión en la fundición vermicular puede ser alto, por ejemplo de 520 MPa; usualmente la ductilidad es de 1 a 6%. Los esfuerzos de tensión y fluencia son casi iguales a las fundiciones grises de alto valor de esfuerzo en los valores más bajos de carbón equivalente del rango de la fundición gris.

Las propiedades de impacto y fatiga no son similares a los de la fundición dúctil, son sustancialmente mejores que las de la fundición gris, la combinación de un alto esfuerzo y una buena resistencia al impacto acoplada a una buena capacidad para la dispersión de calor, hacen que la fundición vermicular tenga una gran aplicación donde el uso de la fundición gris y la fundición nodular no son completamente satisfactorias. Esta superioridad de la fundición vermicular en las propiedades mecánicas sobre la fundición gris se debe a que los precipitados de grafito son redondeados en la fundición vermicular, constituidos por muescas inferiores menos severas y mas angulares que las hojuelas de la fundición gris.

#### **PROPIEDADES DE TENSIÓN Y DUREZA.**

La fundición con grafito compacto tiene esfuerzos de fluencia y tensión similares a los de la fundición dúctil y a los de la fundición maleable, tiene un comportamiento elástico a un bajo nivel de proporcionalidad como la fundición dúctil, para una matriz perlítica los esfuerzos de tensión y fluencia son altos. Por lo tanto las propiedades de tensión y dureza están directamente relacionadas con el tipo de microestructura que presenta esta fundición y más aún, con la cantidad y distribución del grafito; se puede ver que si se tiene una matriz ferrítica, los esfuerzos disminuirán así como la dureza, pero se tendrá una elevada elongación, y al contrario, conforme se aumente el porcentaje de perlita los esfuerzos aumentarán la dureza pero la elongación disminuirá. El valor más bajo de esfuerzo se obtiene con alto carbón equivalente y con una matriz ferrítica.

**PROPIEDADES DE IMPACTO.**

Mientras que la fundición dúctil presenta sustancialmente una alta dureza a elevados contenidos de perlita, la fundición vermicular perlítica tiene un esfuerzo de impacto equivalente a la fundición dúctil, los valores de la energía de impacto a 21°C y a -41°C se observa que la fundición vermicular producida a partir de una fundición dúctil absorbe una gran energía como si se hubiera obtenido a partir de una fundición gris. Los estudios realizados en la iniciación y crecimiento de la fractura bajo condiciones de impacto muestran que, en general, la iniciación de la fractura en la matriz es precedida por la fractura del grafito, por la interfase grafito-matriz o a través del grafito o ambas.



Tabla 1 Propiedades físicas y mecánicas para una fundición vermicular con 10% de nodularidad.

| Propiedad                                 | Método de Prueba                     | Temperatura (°C) | 70% Perlita | 100% Perlita |
|-------------------------------------------|--------------------------------------|------------------|-------------|--------------|
| Esfuerzo de tensión (MPa)                 | ASTM E8M (25°C)                      | 25               | 420         | 450          |
|                                           | ASTM E21                             | 100              | 415         | 430          |
|                                           | (100°C y 300°C)                      | 300              | 375         | 410          |
| Esfuerzo de fluencia al 0.2% (MPa)        | ASTM E8M (25°C)                      | 25               | 315         | 370          |
|                                           | ASTM E21                             | 100              | 295         | 335          |
|                                           | (100°C y 300°C)                      | 300              | 284         | 320          |
| Módulo elástico (GPa)                     | ASTM E8M (25°C)                      | 25               | 315         | 145          |
|                                           | ASTM E21                             | 100              | 140         | 140          |
|                                           | (100°C y 300°C)                      | 300              | 130         | 130          |
| Elongación (%)                            | ASTM E8M (25°C)                      | 25               | 1.5         | 1            |
|                                           | ASTM E21                             | 100              | 1.5         | 1            |
|                                           | (100°C y 300°C)                      | 300              | 1           | 1            |
| Unnotched Límite de Fatiga (MPa)          | Girado-doblado a 3000 rpm            | 25               | 195         | 210          |
|                                           |                                      | 100              | 185         | 190          |
|                                           |                                      | 300              | 165         | 175          |
| Proporción de endurecimiento              | Límite de fatiga/UTS                 | 25               | 0.46        | 0.44         |
|                                           |                                      | 100              | 0.45        | 0.44         |
|                                           |                                      | 300              | 0.44        | 0.43         |
| Conductividad Térmica (W/m°C)             | Flujo de calor axial ASTM E1225      | 25               | 37          | 36           |
|                                           |                                      | 100              | 37          | 36           |
|                                           |                                      | 300              | 36          | 35           |
| Coeficiente de expansión térmica (mm/m°C) | Dilatómetro Pushrod DIN51 045        | 25               | 11          | 11           |
|                                           |                                      | 100              | 11.5        | 11.5         |
|                                           |                                      | 300              | 12          | 12           |
| Radio de Poisson                          | ASTM E132                            | 25               | 0.26        | 0.26         |
|                                           |                                      | 100              | 0.26        | 0.26         |
|                                           |                                      | 300              | 0.27        | 0.27         |
| Esfuerzo de compresión al 0.02% (MPa)     | ASTM E9 (longitud mediana)           | 25               | 400         | 430          |
|                                           |                                      | 400              | 300         | 370          |
| Esfuerzo de fatiga factor de reducción    | Depende de la geometría de la muesca | 25               | 1.40-1.80   | 1.4-1.8      |
| Densidad (g/cm <sup>3</sup> )             | Desplazamiento: (750x25x25)mm        | 25               | 7.0-7.1     | 7.0-7.1      |
| Dureza Brinell (BHN)                      | Penetrador de 10 mm, 3000Kg de carga | 25               | 183-235     | 207-255      |

**USOS Y VENTAJAS DE LA FUNDICIÓN VERMICULAR (CGI).** <sup>(1,13,15,19)</sup>

La aplicación de la fundición vermicular proviene de su relativa posición entre la fundición gris y la dúctil. La fundición vermicular tiene ventajas sobre la fundición gris:

- ✓ Altos niveles de resistencia a la tensión con un contenido similar de carbón equivalente, esto reduce la necesidad de agregar elementos aleantes tales como Ni, Cr, Cu y Mo.
- ✓ Una alta relación de esfuerzo de tensión-dureza.
- ✓ Una mejor ductilidad y dureza con lo cual se tiene un gran margen de seguridad contra una posible fractura.
- ✓ Baja oxidación a alta temperatura.

En cuanto a ventajas sobre la fundición nodular tenemos:

- ✓ Bajo coeficiente de expansión térmica.
- ✓ Alta conductividad térmica.
- ✓ Mejor resistencia al choque térmico.
- ✓ Mejor maquinabilidad.

La fundición vermicular puede sustituir con buenos resultados a los hierros grises en casi todos los casos donde el esfuerzo que soportan este tipo de fundiciones es insuficiente. Como por ejemplo, grandes artefactos de diesel, en cigüeñales, para anaqueles de carga, poleas para camiones y ruedas con engranes.

Como se mencionó, la conductividad térmica de la fundición vermicular es más alta que la de la fundición dúctil, por lo tanto se prefiere para condiciones de alta temperatura y bajo condiciones de fatiga térmica, estas

aplicaciones son en lingoteras, cigüeñales, cabezas de cilindros de carro y en los frenos de disco.

La gran aplicación industrial que se tiene con esta fundición es, por ejemplo, para autos modernos y partes para camión, se requiere que el monoblock trabaje a temperaturas alrededor de los 500 °C, a esta temperatura los monoblocks de fundición gris se rompen, la fundición dúctil tiende a torcerse y al contrario, si son de fundición vermicular, la oxidación y el efecto de que se tuerzan es muy baja. Otras aplicaciones son en turbinas de la industria termoeléctrica y para frenos de disco en trenes.

#### **EFFECTOS DE LOS ELEMENTOS ALEANTES.** (6,7,8,9,10,18)

**CARBONO.** El carbono es muy importante ya que tiene un gran efecto en las propiedades mecánicas y físicas de las fundiciones férreas, el carbono puede existir como carbono libre (carbono grafito), el cual es muy suave y poco tenaz, aparece en forma de hojuelas, vermículos y esferoides (fundición nodular). Puede aparecer como carbono combinado, conocido como cementita, que es muy dura, con baja ductilidad y puede descomponerse en ferrita y grafito. La estructura de estas fundiciones depende de la cantidad de carbono presente, la forma, tamaño y distribución de las partículas de carbono grafito.

El carbono está en cantidades de 2.5% a 4.5 % en peso. El porcentaje de carbono total en la fundición puede determinarse por análisis químico o por el grado de grafitización asumiendo la siguiente relación:

$$\% \text{ carbono total} = \% \text{ carbono grafito} + \% \text{ carbono combinado}$$

Si la grafitización es total el porcentaje de carbono total y el porcentaje de carbono grafito es igual. Si la grafitización no ocurre, el porcentaje de carbono grafito es cero.

**SILICIO.** El silicio actúa como elemento grafitizante, es decir, precipita al grafito. El utilizar cantidades cercanas al 3% reduce parcialmente el rango de formación de austenita durante la solidificación y también causa que se precipite grafito en lugar de cementita a 690 °C cuando ocurre la descomposición eutectoide. La máxima precipitación de grafito ocurre cuando tenemos de 2.5% a 3% de silicio. Si se parte de 2% y se sigue aumentando la cantidad de silicio, se podrá aumentar la cantidad de grafito precipitado, pero si la cantidad de silicio es mayor del 3%, tiene efectos reversibles tales como el incremento en la proporción de carbono combinado o de silicio combinado con hierro ( $\text{Fe}_2\text{Si}$ ,  $\text{Fe}_2\text{Si}_3$ , etc.). Esto se puede observar en la fractura ya que aparece con un aspecto brillante. Además permite la liberación de óxidos y sopladuras, hace que las fundiciones férreas tengan mayor fluidez.

**MAGNESIO.** La nodularidad depende de la cantidad de magnesio residual presente en la composición química fina. 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 de con 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 así como baja densidad.
2. El magnesio es altamente volátil (comparado con la temperatura del tratamiento), su punto de ebullición es 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 el 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 1, si se tiene cantidades menores a 0.01% el grafito se presenta en 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 residuales encuentra el grafito en forma de esferoides.

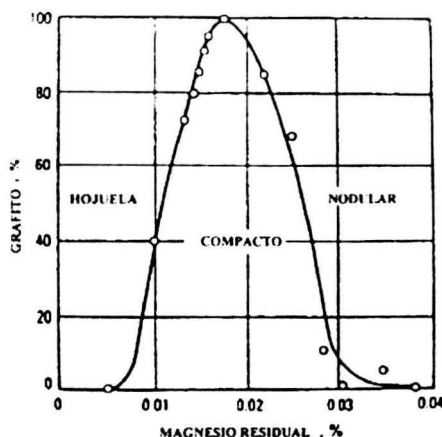


Figura 1. Influencia del contenido de magnesio residual en la forma de grafito y su porcentaje presente.

**COBRE.** Es un agente grafitizante y promotor de la perlita. Produce un endurecimiento de la ferrita que es considerado como un efecto directo,

pues, además, causa indirectamente la grafitización de la fundición durante la solidificación en un término medio en comparación con el Silicio, el Cobre influye negativamente en el crecimiento del grafito, tanto así, que en altas proporciones (3.2%) destruye completamente los nódulos.

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

**MANGANESO.** El manganeso es un agente formador de carburos (perlitzante), por lo cual si se incrementa el contenido de Mn se tendrá un incremento en los valores de los esfuerzos de tensión y fluencia.

El manganeso incrementa la proporción de carbono que está en forma combinada (cementita), pero su influencia está delimitada por la cantidad de azufre presente, ya que se forma MnS, por lo tanto es un agente desulfurante y desoxidante, gracias a estas dos propiedades, el metal líquido tiene una mejor fluidez.

Para obtener una matriz perlítica, el manganeso debe encontrarse en una proporción de 0.5% a 0.75%.

**FÓSFORO.** Cuando la cantidad de fósforo es muy alta tiende a formar un microconstituyente llamado esteadita (ferrita y fosfuro de hierro), la cual es un precipitado eutéctico que solidifica a temperaturas entre 982 °C a 954°C. En solución, este compuesto tiende a estabilizar la perlita. Al observar la microestructura de las fundiciones, la esteadita tiene una forma triangular cóncava. Este microconstituyente es duro debido a que el fosfuro de hierro es un compuesto intermetálico. El fósforo, en grandes cantidades decrece la maquinabilidad, incrementa la fragilidad y la fluidez.

**AZUFRE.** El contenido de azufre en los hierros vermiculares y nodulares se encuentra entre 0.005% a 0.015%, la razón fundamental de tener bajos contenidos de azufre es que antes de realizar el tratamiento de nodularización con magnesio, éste se combina con el azufre, y hasta que finaliza la formación de  $MgS$  se tendrá el efecto de nodularización. Por lo tanto esta combinación hace que el magnesio no cumpla con su cometido haciendo que se aliente más magnesio para que se tenga una buena nodularización. El producto de esta combinación,  $MgS$ , solidifica a temperaturas alrededor de la solidificación de la fundición. Debido a lo anterior, para fundiciones vermiculares y nodulares, el contenido de azufre debe ser bajo.

### **ESTABILIDAD DE LOS CGI. (1,12,19)**

La razón principal de que los hierros con grafito compacto no fueran adoptados anteriormente por las líneas de producción, es que el rango de estabilidad es muy estrecho para asegurar una producción libre de riesgos. No obstante, las especificaciones del magnesio (Mg) actual son diferentes para cada producto, en general amplían el rango en un 0.008%. En la práctica, sin embargo, el rango usado es igualmente pequeño. Lo anterior debido a que el magnesio activo se disipa a una velocidad de 0.001% cada 5 min, la composición del hierro al inicio de la colada debe ser suficientemente lejana de la abrupta transición de CGI-hierro gris. Este amortiguador es necesario para asegurar que las hojuelas de grafito no se formen antes de finalizar la colada, la cual puede ser tan larga como 15 min después de la adición inicial de magnesio. Simultáneamente, el nivel de magnesio no debe acercarse mucho al límite superior con el objetivo de minimizar la formación de hierro nodular en las secciones delgadas por el rápido enfriamiento.

Una segunda consideración es que el magnesio en la composición no es constante. Si la composición del oxígeno activo (O) y/o el azufre (S) son elevados consumirán al magnesio activo por lo que se deberá considerar un nivel elevado de magnesio. Recíprocamente, Si el O y S son bajos en la composición química, el nivel de magnesio a considerar será bajo. Por estas razones, las variaciones en la carga y la historia del metal fundido, hacen imposible definir una especificación química fija para los CGI.

No obstante, la transición de CGI-hierro gris ocurre sobre una composición tan pequeña como 0.001% de Mg activo, la disipación natural del Mg inicialmente no resulta totalmente en una microestructura de tipo hojuela. En la ausencia de suficiente Mg, el grafito comienza a crecer con morfología de hojuela. Como la solidificación eutéctica procede radialmente hacia afuera, el Mg segrega al frente de la interfase sólido-líquido y, dependiendo del contenido inicial de magnesio, el grafito compacto puede volverse estable cerca del perímetro de la celda eutéctica, El resultado final es que el grafito tipo hojuela primero aparece en las microestructuras de los CGI como discretas trazas de hojuelas.

La abrupta transición CGI-hierro gris es ilustrada en la Figura 2, la cual muestra que las hojuelas en una barra de prueba de 25 mm de diámetro puede ser convertidas totalmente a microestructuras de grafito compacto, con la adición de solo 10 g de Mg en una tonelada métrica de hierro.



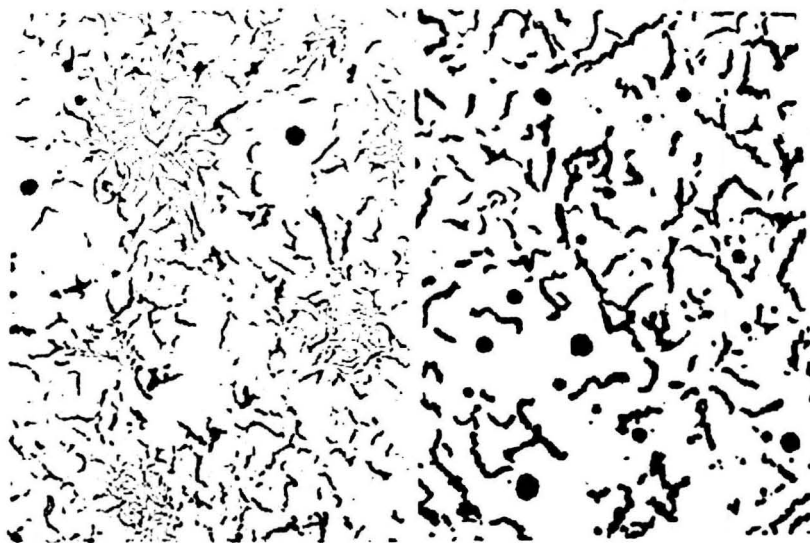


Figura 2. La adición de 0.001% de magnesio activo es suficiente para convertir las trazas de hojuelas de grafito presentes en las microestructuras de los CGI en una microestructura de elevada calidad del 3% de nodularidad.

El rango estable para los CGI asimismo es sensible a la adición del inoculante. Los niveles elevados de inoculación promueven una mayor nucleación, favoreciendo así al grafito nodular. Altos porcentajes de inoculación deben ser compensados con bajas adiciones de Mg mientras más bajos sean los niveles de inoculación se requieren niveles superiores de Mg para asegurar el crecimiento del grafito compacto. Factores como el sobrecalentamiento del horno, tiempo de permanencia, composición de la carga, tipo y cantidad de inoculante influyen por lo tanto los requerimientos del Mg. La sensibilidad de los hierros con grafito compacto es ilustrada en la Figura 3., la cual muestra que la adición de 750g de inoculante a 1 tonelada métrica pueden cambiar la nodularidad de un 3% a un 21% en una barra de prueba de 25 mm de diámetro.

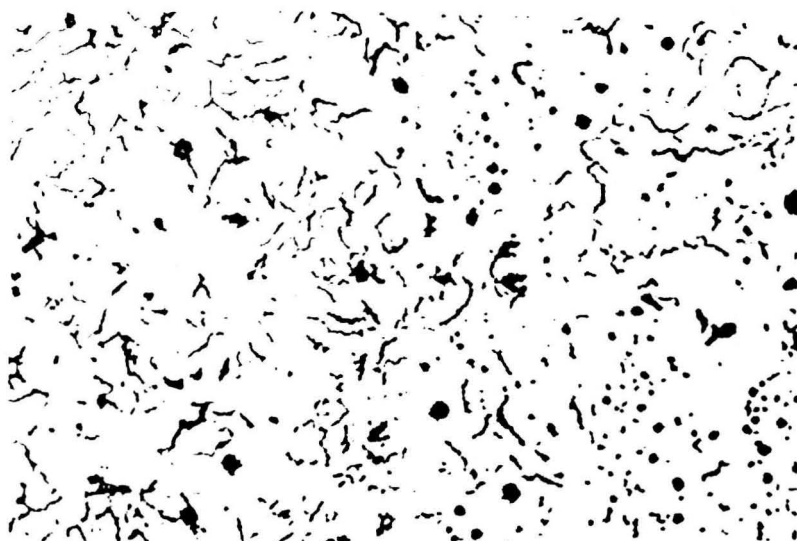


Figura 3. La adición de 0.075% de post-inoculante puede provocar que la microestructura del CGI se incremente de un 3% de nodularidad a un 21% de nodularidad en una barra de prueba de 25 mm de diámetro.

El control de proceso tecnológico debe mantener un análisis preciso del comportamiento de la solidificación del metal líquido, por la sencilla razón de que no es posible controlar lo que no se mide. El control confiable del grafito compacto requiere medidas simultáneas para el comportamiento del Mg, la aproximación del tratamiento de nodulización a la zona de transición con el hierro gris, la disipación del Mg y los niveles de inoculación. Por lo que deben ser analizados y estudiados cada uno de estos sistemas para un óptimo desempeño.

El contenido de magnesio para producir grafito esferoidal y vermicular en las fundiciones se encuentra en el rango típico de 0.025% a 0.08% en peso de magnesio total y esto también depende del contenido de azufre. Cuando se adiciona el magnesio en la fundición líquida actúa como desoxidante, desulfurante y altera la forma del grafito así como también promueve la formación de carburos eutécticos. Si no se controla el

tratamiento de esferoidización o hay un contenido elevado de oxígeno y/o azufre, la cantidad de esferoidizante será baja, lo cual propiciará que no se efectúe la transformación a grafito vermicular o esferoidal. Al contrario, si la cantidad de magnesio en forma de sulfuro de magnesio es excesiva, habrá una cantidad alta de ledeburita en la fundición, debido a que el sulfuro es antigrafitizante.

Como se mencionó, el magnesio es un excelente desoxidante, por lo tanto, se produce  $MgO$  el cual es muy estable y tiene una temperatura de fusión elevada. Por la baja densidad del  $MgO$ , flota en la superficie de la fundición líquida incorporándose a la escoria. También el  $MgS$  tiene una baja solubilidad en la fundición líquida, y debido a su baja densidad también flota incorporándose a la escoria.

El magnesio es un excelente modificador de la forma del grafito durante la solidificación, con pequeñas cantidades de magnesio, como un 0.018%, se presenta una estructura con grafito esferoidal con contenidos bajos de oxígeno y azufre.

En el proceso de nodularización se tiene un bajo rendimiento de magnesio, esto se debe a su punto de ebullición ( $1107\text{ }^{\circ}C$ ), al tener contacto con la fundición líquida, se volatiliza. A esta temperatura del baño líquido la presión de vapor es de  $9\text{ Kg/cm}^2$ .

El magnesio se integra al seno de la solución fácilmente, porque tiene un bajo punto de fusión y de ebullición con respecto al hierro, haciendo que se consuma con mayor facilidad. Además de que puede combinarse con oxígeno y azufre, el producto de estas combinaciones tiene un alto punto de fusión, con lo cual flotarán en la superficie del material integrándose a la escoria. Cuando hay un gran contenido de azufre en la escoria que en el metal líquido, este azufre se integra al seno del metal líquido teniendo así,

un exceso de azufre, lo cual puede modificar la reacción de nodularización, obteniendo un grafito diferente al deseado, o en su caso, al no tener más magnesio que reaccione con azufre, este reaccionara con manganeso formando el precipitado MnS.

### **CONSIDERACIONES DURANTE LA PRODUCCIÓN.<sup>(19)</sup>**

Es importante señalar que la producción de fundiciones vermiculares requiere el control simultaneo del Mg y el inoculante desde el comienzo hasta finalizar la colada con el objetivo primordial de mantener las especificaciones de microestructura.

A pesar de todos los esfuerzos y disciplinas, variaciones en la base del tratamiento resultan inevitables. Variaciones como la combinación de cargas con diferentes composiciones químicas, la temperatura del horno, tiempo de permanencia, precalentamiento del convertidor, velocidad de tapado, condiciones del empaquetamiento de las aleaciones, contenido de Mg en el nodulizante y la cantidad de materia prima utilizada, todo, afecta la recuperación de magnesio.

Sumado a estas variables, la presencia de O y S activos contenidos en el metal líquido, cambian los niveles y los rangos de localización para la producción de grafito compacto, así como, las variaciones de tiempo de permanencia en el convertidor, transporte y colada modifican el tiempo disponible de disipación del Mg.

Finalmente, otra fuente de variaciones puede ser provocada por el operador (error humano), o diferencias en los hábitos de trabajo de los operadores en turno. Durante grandes volúmenes de producción, la única forma certera de eliminar variaciones en el proceso es evaluando el

comportamiento de la solidificación del metal después del tratamiento que se ha realizado. De esta forma, todas las variables influenciadas recaen sobre la aleación, el tamaño y ubicación del grafito compacto son agotadas. Por lo que adiciones correctivas de Mg y/o inoculante pueden ser realizadas, si es necesario, para llevar cada fundición al comportamiento deseado de la solidificación antes de comenzar la colada. Un paso doble estratégico de control de medición y corrección minimiza las variaciones y elimina el riesgo de presentar grafito en forma de hojuela en el producto final.

### **CONTROL DE PROCESO PARA LA PRODUCCIÓN DE CGI.<sup>(19)</sup>**

El control del proceso comienza por obtener una muestra para el análisis térmico del Mg y el inoculante con el tratamiento establecido. Dependiendo de los resultados del análisis térmico, el software determinará las cantidades necesarias de Mg e inoculante necesarias y el operador realizará la corrección. Al finalizar el ajuste necesario, el convertidor es transportado a la línea de moldes para comenzar la colada. El total de mediciones y procesos de corrección requieren cerca de 3 minutos y son conducidos en paralelo con el retiro de escoria del metal y el transporte del convertidor.

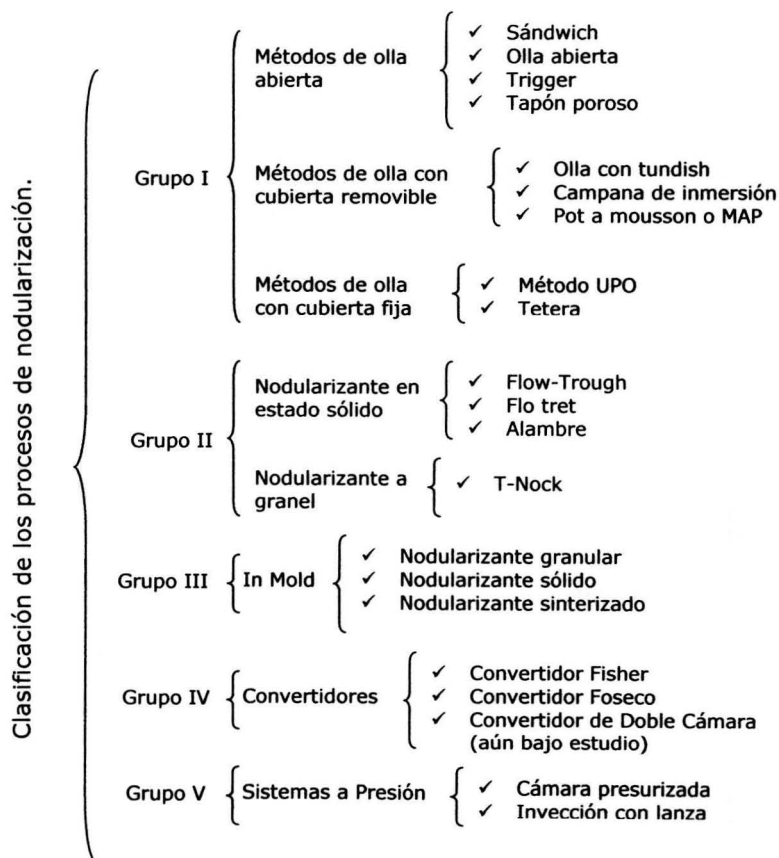
### **EFFECTO DE LAS TIERRAS RARAS.<sup>(12,19)</sup>**

Es sabido que las condiciones del alto sobre-enfriamiento del metal con un tratamiento de tierras raras base silicio son necesarias para adquirir la formación de grafito compacto y/o nodular. Sin embargo, esta condición también promueve la formación de carburos en secciones delgadas. De hecho, la eliminación de la hojuela de grafito no es realizada hasta que el metal se encuentra bajo un adecuado enfriamiento. Para obtener una microestructura aceptable de grafito compacto y/o nodular un exceso de

tierras raras usualmente son agregadas, las cantidades dependen a su vez de variables de otros procesos. Este pronunciado efecto de enfriamiento de las tierras raras, especialmente el cerio (Ce), es una de las razones del por qué las tierras raras son usadas frecuentemente como agentes para la producción de hierro dúctil o hierro con grafito compacto. El efecto de la post inoculación como agente eliminador o reductor del efecto del enfriamiento en hierros tratados con tierras raras es por consiguiente, de gran interés.

**CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE NODULARIZACIÓN.** (16,17,18)

A continuación se presenta una clasificación esquemática sobre los principales procesos de nodularización:



La presente tesis consideró únicamente los procesos de nodularización del grupo IV (Convertidores).

### CONVERTIDOR FISHER.

Este tipo de convertidor consta de un recipiente cubierto con refractario de alta alúmina que presenta 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. 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>.

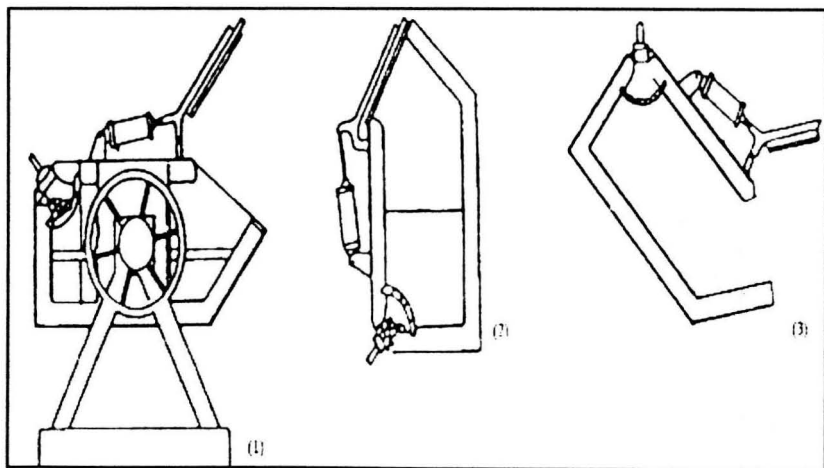


Figura 4. Representación esquemática de las posiciones del convertidor Fisher durante el tratamiento de nodularización. 1) El convertidor es cargado con metal líquido y aleación nodulizante en la cámara. 2) Convertidor en posición vertical, se lleva a cabo, la reacción de nodulización. 3) Finalmente 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 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 posición vertical el metal fundido rodea la cámara de reacción y entra a través de los orificios de la placa, provocando la reacción del Mg, 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:

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

### **CONVERTIDOR FOSECO**

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

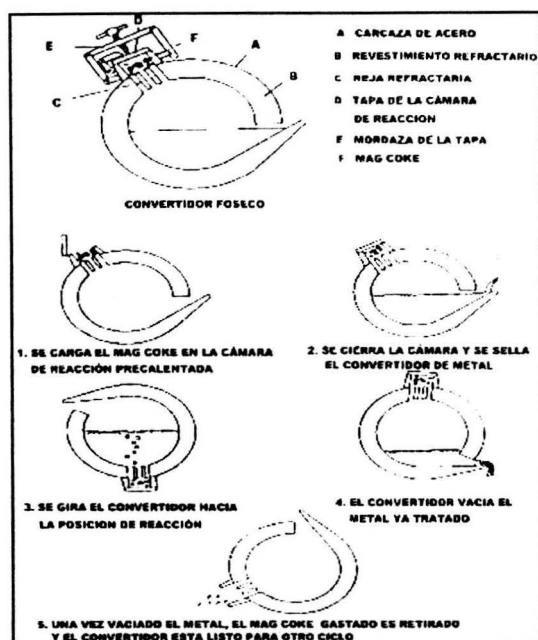


Figura 5. Esquema del convertidor Foseco

La unidad es un diseño creado por FOSCO, 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.

### CONVERTIDOR DE DOBLE CÁMARA.

Como su nombre lo indica consta de dos cámaras; el metal líquido es recibido en una de ellas, mientras que la otra cámara contiene los tratamientos de inoculación y nodulización. Una vez cargados el metal líquido y el tratamiento de nodulización, el convertidor es cerrado y sellado, ya que este tipo de convertidor gira sobre el eje de los manuales que lo

soportan para permitir el ingreso del metal líquido a la cámara de reacción donde entra en contacto con el tratamiento de nodulización.

Al finalizar el tratamiento es girado nuevamente a su posición original, en donde es retirada la tapa, para eliminar la escoria producida y realizar la colada en los moldes.

La técnica de nodulización mediante convertidores de doble cámara continúa bajo estudio y pretenden reducir los consumos de nodulizante entre sus principales características y ventajas.

## **CAPITULO II**

### **2. FABRICACIÓN DEL CONVERTIDOR DE DOBLE CÁMARA.**

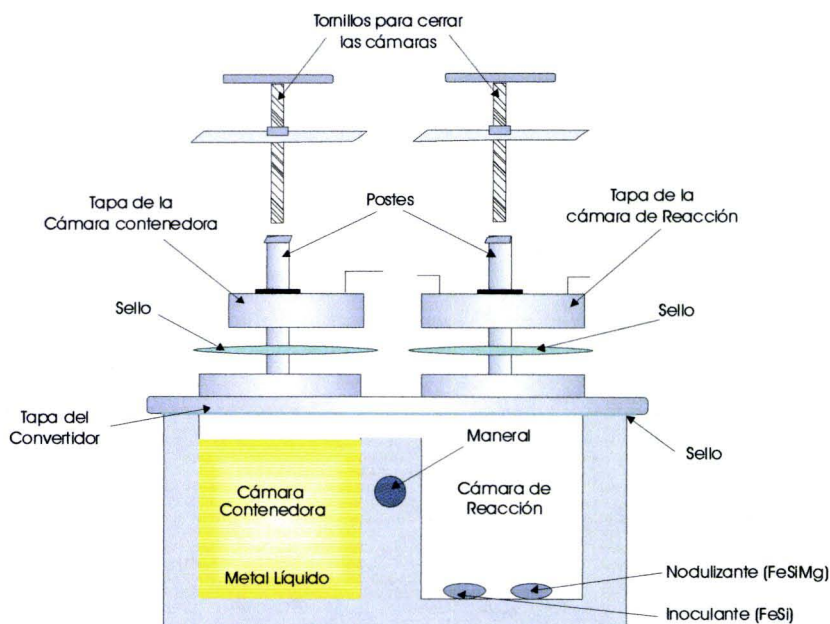
El presente trabajo siguió dos vertientes de experimentación. Por una parte se establecieron las condiciones y requerimientos teóricos que fundamentan la planeación, diseño y fabricación del convertidor de doble cámara que se describe en este capítulo y forman parte del desarrollo experimental de esta tesis; sin embargo, el desarrollo experimental al cual se hace referencia en el Capítulo IV describe una serie de procedimientos y técnicas para la fabricación de hierro vermicular en dicho convertidor.

Antes de comenzar con la fabricación del reactor hubo de considerar amplios y diversos aspectos, como las dimensiones del convertidor, sus módulos de enfriamiento y sobre todo el diseño.

El convertidor consiste de dos cámaras cilíndricas, (1) la cámara de recepción o contenedora y (2) la cámara de reacción. La cámara contenedora es la responsable de recibir al metal líquido; ambas cámaras son selladas con sus respectivas tapas y sellos, son perfectamente oprimidas con su tornillo para evitar fugas y mediante un giro del convertidor de 135° sobre el eje los manerales, el metal líquido ingresa a la cámara de reacción en donde reacciona con el tratamiento de nodulización al mismo tiempo que el inoculante se incorpora al metal líquido. El Esquema 2.1 muestra el convertidor de doble cámara en un corte transversal, así como, sus accesorios característicos.

La estimación de los módulos de enfriamiento de las cámaras fue el punto inicial en la construcción y diseño del convertidor, ya que se tomó como prioridad encontrar un volumen cilíndrico de 35 Kg de capacidad de hierro que mantuviera la menor área superficial con el objetivo de minimizar

las pérdidas de calor por área superficial. El área de transferencia de energía (área superficial) tiene una relación inversamente proporcional al módulo de enfriamiento. Aprovechando las ventajas de los lenguajes de programación actuales se diseñó el programa "Módulos de Enfriamiento", el cual permitió evaluar de manera ágil y versátil dichos módulos. En el capítulo III se describen sus funciones y operación.



Esquema 2.1. Convertidor de Doble cámara

## 2.1 MODELOS A ESCALA.

Como se mencionó anteriormente la idea de que las cámaras del convertidor tuvieran un módulo de enfriamiento adecuado, fue una de las principales premisas que se consideraron, por lo que se propusieron tres modelos de diferentes dimensiones y módulos, pero de igual capacidad para evaluar y aproximar el comportamiento del líquido, así como del nodulizante

dentro del convertidor. Para ello, se fabricaron en resina 3 modelos a escala (Figura 2.0) a un 30% de las dimensiones originales estimadas a través de los módulos de enfriamiento, posteriormente se evaluó y determinó para cada modelo el ángulo de giro (Figura 2.1) adecuado que permite el flujo del metal líquido de la cámara contenedora a la cámara de reacción; este mismo ángulo debe tener la propiedad de evitar que el nodulizante atrapado en la cámara de reacción se escape por el puente que comunica ambas cámaras. La Tabla 2.1 indica la altura y el diámetro tanto de las dimensiones reales como a escala de los convertidores evaluados.



Figura 2.0. Modelos de resina



Figura 2.1. Modelos de resina

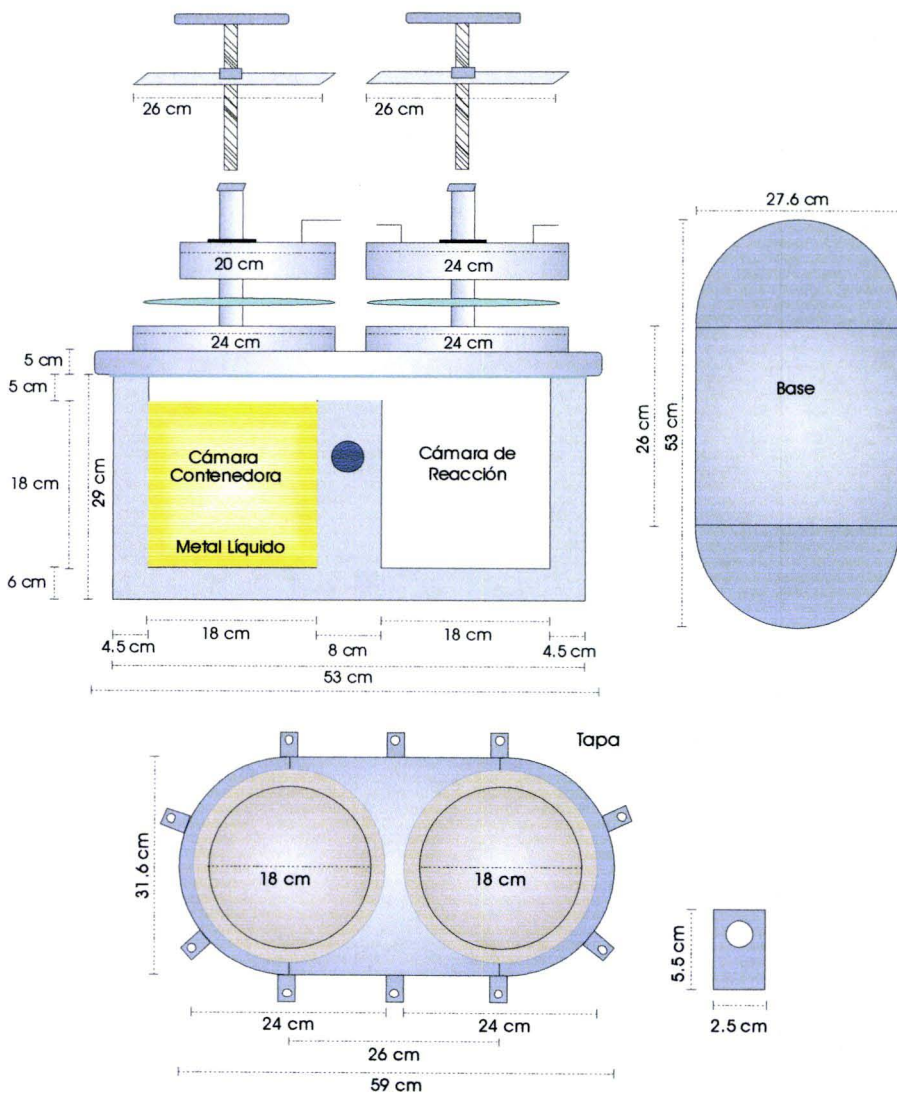
En los tres casos se presenta una adecuada retención del nodulizante (simulación realizada con ácido acetilsalicílico) siendo el modelo 1 el más eficiente en este aspecto, sin embargo, el modelo 3 presentó una adecuada retención además de poseer el mejor módulo de enfriamiento, por lo que se optó por dicho modelo.

Tabla 2.1. Dimensiones reales y a escala de los convertidores evaluados

| Modelo | Dimensiones Reales |        | Modulo de enfriamiento | Dimensiones a escala |        |
|--------|--------------------|--------|------------------------|----------------------|--------|
|        | h                  | $\phi$ |                        | h                    | $\phi$ |
| 1      | 30                 | 14     | 2.79                   | 9                    | 4.2    |
| 2      | 25                 | 15     | 2.89                   | 7.5                  | 4.5    |
| 3      | 18                 | 18     | 2.97                   | 5.4                  | 5.4    |

## 2.2 DIMENSIONES DEL CONVERTIDOR DE DOBLE CÁMARA.

Las dimensiones reales para la construcción del convertidor de doble cámara fueron las siguientes:





El modelo a escala seleccionado de entre los tres fue el que poseía un módulo de enfriamiento mayor, lo anterior con la finalidad de obtener mayor margen de tiempo para la manipulación del metal líquido en el convertidor y evitar la solidificación prematura.

### **2.3 FABRICACIÓN DEL CAPARAZÓN DEL CONVERTIDOR.**

Las plantillas fueron trazadas en cartulina blanca que a su vez fueron copiadas sobre placas de acero al carbón. Con un esmeril y un disco de corte (Figura 2.2) se realizaron los cortes de la placa de acero que dieron forma a la base, los laterales y las tres tapas del convertidor. Para construir la región lateral del convertidor fue necesario seccionar placas (Figura 2.3) y deformarlas hasta alcanzar el arco requerido (Figura 2.4)



Figura 2.2. Corte de placa de acero.

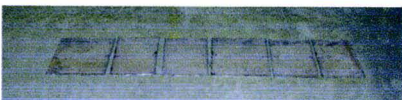


Figura 2.3. Placa de acero.

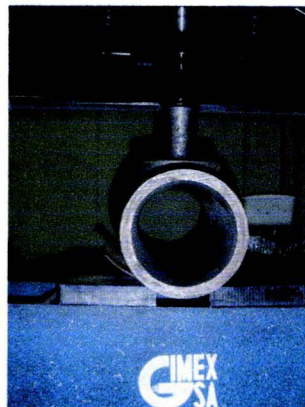


Figura 2.4. Corte de placa de acero.

Fue necesario cortar dos placas adicionales de menor tamaño que separarían las dos cámaras, estas placas de menores dimensiones tienen la función de actuar como soporte, ya que presentan una serie de orificios por



los cuales ingresaría el refractario evitando que pueda ser desprendido por su mismo peso o la acción de los giros al momento del tratamiento de nodulización. Fueron acopladas y "punteadas" las placas, el término "puntear" significa que solo es colocado un punto de soldadura en la superficie a soldar. Antes de comenzar a soldar es importante haber realizado este proceso en todas las regiones, ya que por el efecto del calentamiento el acero sufre deformaciones, de modo que las áreas que no tienen puntos de soldadura quedan dobladas y/o fuera de lugar. Ya unidas las placas del convertidor son generados los cordones de soldadura (Figura 2.5). Los cordones de soldadura fueron situados de manera uniforme y constante en forma de zig-zag (Figura 2.6). La escoria generada fue retirada con la utilización de un cincel y un cepillo de alambre.



Figura 2.5. Soldado del convertidor.

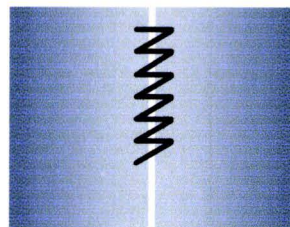


Figura 2.6. Trayectoria de soldadura.

## **2.4 FABRICACIÓN DE LA TAPA DEL CONVERTIDOR**

La tapa al igual que la sección lateral y la base del convertidor fue trazada en una plantilla de tamaño real, copiada sobre la placa de acero y cortada con el esmeril. Se unió una solera de acero a la periferia de la tapa y se realizaron las entradas (bocas), dichas entradas fueron originalmente trazadas en la tapa de acero, con el taladro se perforó dicha circunferencia (Figura 2.7) y con sierra eléctrica (caladora) fue finalizado el

desprendimiento de los círculos de acero. En la Figura 2.8 se pueden apreciar el convertidor y la tapa en una primera etapa.



Figura 2.7. Recorte de las bocas del convertidor.



Figura 2.8. Vista previa de la tapa y el convertidor.



Figura 2.9. Vista previa de la tapa y el convertidor.

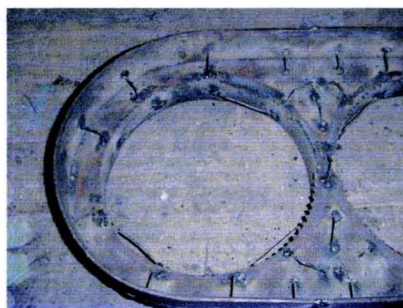


Figura 2.10. Vista previa de la tapa y el convertidor.

En la parte superior de la tapa fueron soldadas un par de soleras que rodean las entradas a las cámaras (Figura 2.9). Con el objetivo de brindarle mayor firmeza al refractario, en la tapa se colocaron una serie de soportes (Figura 2.10) los cuales actúan como columna vertebral evitando que en un futuro se desprenda el refractario.

La tapa del convertidor (Figura 2.9) a su vez lleva otras dos tapas adicionales que cierran las entradas de las cámaras. Una de las tapas sella perfectamente la cámara de reacción mientras que la otra cierra de manera

parcial la cámara contenedora permitiendo la salida de gases. Ambas tapas fueron fabricadas uniendo una solera de acero al perímetro de los círculos extraídos de la tapa original (Figura 2.11); al igual que en la tapa del convertidor, fueron adicionados los soportes para el refractario en ambas tapas de las cámaras. La (Figura 2.12) muestra a la tapa de la cámara de reacción colocada sobre la tapa del convertidor.

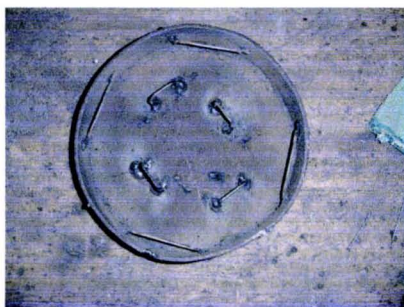


Figura 2.11. Tapa de la cámara de reacción.



Figura 2.12. Tapa del convertidor & tapa de la cámara de reacción.

## **2.5 MANERALES DEL CONVERTIDOR.**

A los costados de la coraza del convertidor fueron soldados los manerales que permiten la movilidad del convertidor y mediante los cuales se regula el giro del mismo. Los manerales conjuntamente, tienen la función de sostener al convertidor con la grúa por medio de una escuadra que es enganchada (Figura 2.13).



Figura 2.13. Convertidor suspendido.



## **2.6 INCORPORACIÓN DEL REFRACTARIO**

Para la formación de las cavidades de las cámaras del convertidor y de su respectiva tapa, fue necesario rellenar dos cilindros de unisel con yeso y fragmentos de unisel (Figura 2.14), lo anterior para evitar que el cilindro colapse o sufra deformaciones al momento de compactar el refractario. Cabe mencionar que los cilindros de unisel tuvieron las mismas dimensiones especificadas para las cámaras del reactor, además los cilindros fueron protegidos con mica para evitar que el refractario se adhiriera al unisel y favorecer el desplazamiento del cilindro al ser retirado del convertidor.



Figura 2.14. Cilindros de Unisel.



Figura 2.15. Preparación del refractario.

El refractario fue hidratado hasta obtener una consistencia pastosa (Figura 2.15), fue agregado al convertidor (Figura 2.16) hasta formar una capa plana de seis centímetros de espesor; sobre esta capa de refractario fueron colocados los cilindros de unisel, los espacios restantes fueron rellenos con refractario (Figura 2.17) por capas que fueron apisonadas (comprimidas). Antes de cubrir los últimos cinco centímetros, se colocó una preforma del puente que comunica ambas cámaras, después se completó la adición de refractario (Figura 2.18) y su respectivo compactado. Finalmente fueron retirados la preforma y los cilindros de las cámaras (Figura 2.19). Debido a la gran cantidad relativa de agua empleada y con la finalidad de

evitar que colapsara el refractario instalado, fue necesario dejarlo secar de manera natural por un periodo de 30 días.



Figura 2.16. Base de refractario

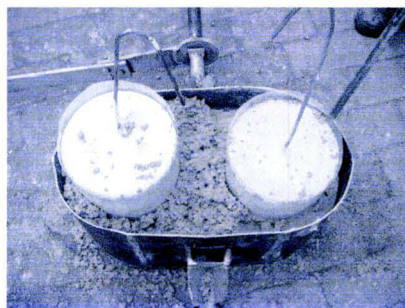


Figura 2.17. Incorporación del refractario



Figura 2.18. Unión de las cámaras

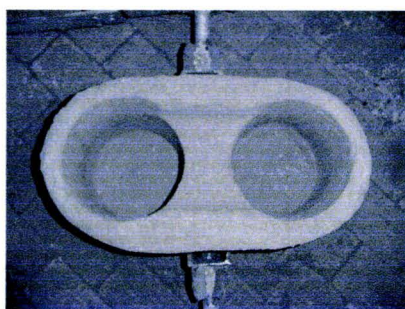


Figura 2.19. Refractario húmedo

La tapa del convertidor siguió el mismo proceso de colocación del refractario (Figura 2.20). Las tapas de las cámaras fueron rellenas completamente con este material (Figura 2.21).



Figura 2.20. Unión de las cámaras



Figura 2.21. Unión de las cámaras

Una vez "seco" el refractario había sufrido una contracción global, por lo que quedó separado de la coraza de metal, esto fue corregido al agregar refractario molido a través de las hendiduras, que a su vez, fueron selladas con barro refractario.

La contracción que presentó el refractario causó algunas grietas pequeñas tanto en la tapa del convertidor como dentro de las cámaras del reactor que fueron reparadas humedeciendo la zona afectada, abriendo la grieta e incorporando material refractario nuevo.

Las dimensiones de las cámaras y sus respectivas entradas permiten un fácil acceso haciendo que el mantenimiento operativo resulte sencillo de realizar y de manera ágil. El ensamble de la tapa al convertidor fue realizado de manera semi-permanente, de modo que esta tapa solo debe ser retirada con fines de mantenimiento especial como el cambio de refractario.

## **2.7. ADITAMENTOS DEL CONVERTIDOR Y TAPAS**

El convertidor y la tapa fueron equipados con una serie de juntas estratégicamente colocadas que coinciden al colocar la tapa sobre el



convertidor (Figura 2.22 & Figura 2.23). Son cerradas mediante tornillos y tuercas de alta resistencia.

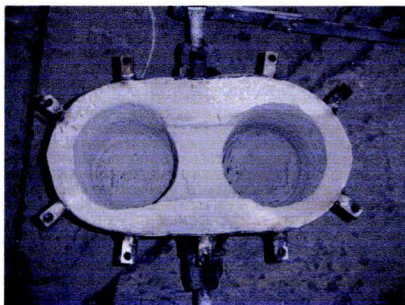


Figura 2.22. Convertidor con juntas

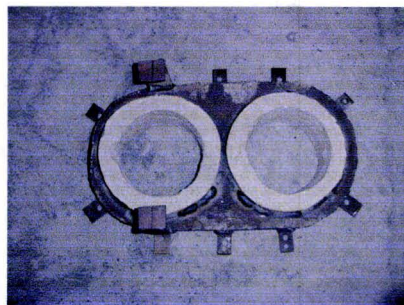


Figura 2.23. Tapa con juntas

Adicionalmente se acoplaron una serie de postes en forma de "L" inversa a los costados de las cámaras. Estas "L" son las bases sobre las cuales se ejerce presión a las tapas de las cámaras para mantenerlas cerradas mediante el giro de una tuerca unida a una placa, y que a su vez está en contacto con los postes (Figura 2.24). Al momento de cerrar la tapa es colocado un sello suave de material refractario que actúa como



Figura 2.24. Cámara de reacción sellada y tapada

empaque, amortiguando el peso sobre la boca de la cámara y evitando así que se dañen el refractario del convertidor y la tapa. Otra de las funciones por la que es colocado este empaque y siendo la más importante, es la de impedir que el convertidor presente fugas de metal líquido.

A las tapas de las cámaras se les incorporaron "agarraderas" para facilitar su manipulación. Así mismo, fue unida una placa en el centro de las

mismas para evitar que la coraza metálica sea dañada por el tornillo al momento de ejercer presión durante su funcionamiento.

## **2.8 QUEMADOR DE DOBLE SALIDA.**

Para realizar el precalentamiento del convertidor fue necesario diseñar un quemador que calentara de manera homogénea ambas cámaras, para ello, las llamas deberían generar la misma "intensidad calorífica" y propagarse en la misma dirección. Para lograr tal efecto se unieron mediante un codo tipo "T" dos conductos con ángulos de 90° en cuyas salidas se incorporaron boquillas reguladoras (Figura 2.25), las cuales son responsables de concentrar y dirigir la llama.

El combustible utilizado por el quemador es gas natural mezclado con aire y es impulsado con la ayuda de un ventilador. Para regular el flujo de combustible que sale por el quemador superior e inferior existe una manija que es orientada de manera manual a favor de una de las dos salidas y mediante la cuál son equilibrados los flujos de salida para un calentamiento homogéneo. Para regular la cantidad de aire, el ventilador cuenta con una puerta que permite o impide el paso de aire parcial, este acceso es regulado de manera manual. En la Figura 2.26 se aprecia el quemador en funcionamiento.

El calor generado por el quemador y acumulado en el reactor es refractado hacia el mismo quemador provocando que éste a su vez se vaya calentando, razón por la cual fue necesario aprovisionarlo con un escudo que recibe el calor refractado. Este escudo consta de dos hojas de acero unidas de forma coplanar en cuya región interna está abastecida con material refractario.



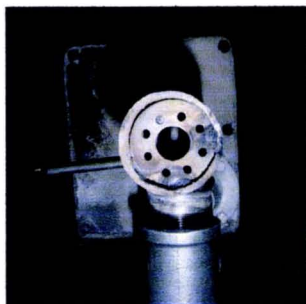


Figura 2.25. Boquilla del quemador



Figura 2.26. Quemador en funcionamiento

## **2.9 SINTERIZADO DEL CONVERTIDOR DE DOBLE CÁMARA.**

La sinterización del convertidor se realizó en tres etapas. El convertidor fue colocado en posición vertical de modo que el quemador pueda tener acceso a las cámaras; esta tipo de montaje es el mismo que será realizado posteriormente en las fusiones para el precalentamiento del reactor. Después de realizar el montaje fue inicializado el quemador provocando que las llamas incidieran dentro de cada cámara del convertidor, así se dio paso a la primera etapa de sinterización al mantener por espacio de dos horas en continuo calentamiento ambas cámaras del convertidor (Figura 2.27), cabe señalar, que el convertidor no fue ensamblado con la tapa, lo que permitió eliminar de manera total la humedad atrapada.



Figura 2.27. Sinterizado del Convertidor.

La siguiente etapa en el proceso de sinterización se llevó a cabo al realizar el mismo proceso ahora con la tapa ensamblada. Finalmente la tercera etapa se realizó al ingresar metal líquido en ambas cámaras.

## **2.9 ENSAMBLE DEL CONVERTIDOR DE DOBLE CÁMARA**

Para la realización del acoplamiento de la tapa al convertidor fue necesario hacer que sus superficies de contacto estuvieran libres de irregularidades como los relieves y desniveles, agregando barro refractario para compensar las zonas hundidas y desbastando las regiones que presentaron exceso de refractario. Posteriormente se seccionó y colocó el sello en el convertidor (Figura 2.28), como se mencionó anteriormente, el sello amortigua el peso y la presión de la tapa así como evita que el convertidor presente fugas de metal líquido.

Finalmente el convertidor fue cuidadosamente tapado haciendo coincidir las juntas para que los tornillos pudieran ser instalados sin necesidad de forzarlos. Las llamadas rondanas de presión fueron empleadas para evitar que las tuercas se aflojaran durante la operación del convertidor. El atornillado del convertidor fue realizado de manera cruzada, para evitar que la tapa quedase ladeada o las tuercas no permanecieran lo suficientemente firmes (Figura 2.29). Para un desempeño eficiente del sello, no debe de ser manipulado una vez instalado, así mismo, debe de ser reemplazado cuando la tapa sea retirada para acciones de mantenimiento o modificaciones de diseño.

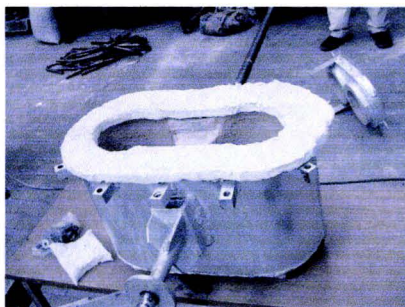


Figura 2.28. Sello del convertidor.

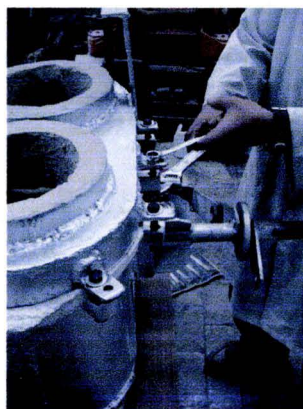


Figura 2.29. Ensamble del convertidor

El convertidor terminado y en operación se ilustra en la Figura 2.30.



Figura 2.30. Convertidor de doble cámara durante el tratamiento de nodulización .

## CAPITULO III

### 3. ENTORNO DE PROGRAMACIÓN.

Visual Basic 6.0 es uno de los lenguajes de programación que más entusiasmo causan entre los programadores de PC's, tanto expertos como novatos. Visual Basic 6.0 es un lenguaje de programación visual, también llamado de 4ª generación. Esto quiere decir que un gran número de tareas se realizan sin escribir código, simplemente con operaciones gráficas realizadas con el ratón sobre la pantalla; a su vez, es un lenguaje de programación basado en objetos, aunque no orientado a objetos como C++ o Java. La diferencia está en que Visual Basic 6.0 utiliza objetos como propiedades y métodos, pero carece de herencia y polimorfismo propios de los verdaderos lenguajes orientados a objetos como los antes mencionados.

Debido a las ventajas que su entorno gráfico ofrece al generar un ambiente amigable para el usuario final, y a la necesidad de un ambiente práctico, ágil y confiable se tomó la decisión de emplear Visual Basic 6.0 para el desarrollo de las aplicaciones utilizadas en este trabajo de tesis que fueron dos: *Módulos de Enfriamiento* y *Proyect GGV25*.

#### 3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA MÓDULOS DE ENFRIAMIENTO.

En una primera etapa, el problema inicial a resolver consistió en determinar el módulo de enfriamiento adecuado con el que debían contar las cámaras del reactor. El módulo de enfriamiento está relacionado directamente con el volumen de las cámaras, por lo que era indispensable proponer un módulo de enfriamiento alto (óptimo) en función de la masa (capacidad de la cámara).

Una de las razones principales para desarrollar *Módulos de Enfriamiento*, es el hecho de que nos permitiría manipular variables como el diámetro del cilindro, la altura, la masa y el volumen con lo que logramos obtener una gran variedad de opciones, de las cuales se tomaron tres condiciones óptimas en orden ascendente a su modulo de enfriamiento para la elaboración de tres convertidores a escala.

### 3.1.1 ENTORNO GRÁFICO.

Como se mencionó al inicio del capítulo III, Visual Basic 6.0 es un lenguaje de programación visual, en la figura 3.1 podemos apreciar el entorno del programa *Módulos de Enfriamiento*.

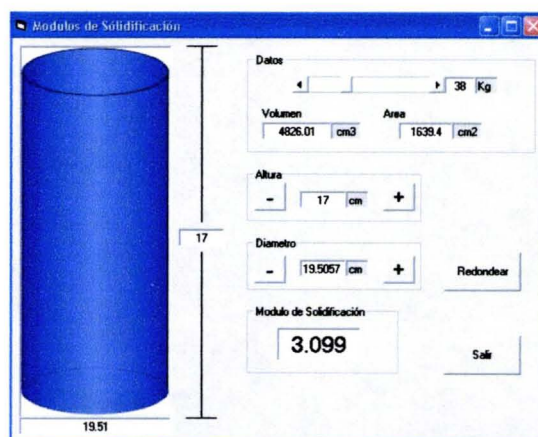


Figura 3.1. Entorno gráfico de Módulos de Enfriamiento.

### 3.1.2 MANUAL DE REFERENCIA.

Una vez en ejecución *Módulos de Enfriamiento* se puede encontrar en la sección *Datos* (figura 3.1) una de las principales variables, la masa, que se encuentra en forma de barra horizontal permitiendo ubicar este valor entre

35 y 45 Kg. Al modificar el valor de la masa automáticamente se actualiza el valor del volumen que ocupa respectivamente.

Una vez fijada la capacidad de la cámara (la masa), se ajustó los valores de la altura de la cámara o su diámetro dando clic en los signos más o menos, hasta encontrar un modulo de enfriamiento, altura y diámetro adecuados; cabe señalar, que al momento de modificar el valor de la altura, automáticamente se ajusta el valor del diámetro y viceversa para conservar el volumen regido por la masa que está contenida dentro de la cámara.

El valor del módulo de enfriamiento se irá generando y regenerando automáticamente conforme se modifique cualquiera de los valores de la altura, diámetro o la masa y éste aparecerá en la parte inferior dentro de la sección *Módulo de Enfriamiento*.

En la sección izquierda del entorno del programa aparece un cilindro en color azul que representa la forma de la cámara. En su costado derecho se van mostrando los valores de la altura y en la parte inferior del cilindro se muestra el valor del diámetro. Las dimensiones que se generan mediante el uso de este software son de carácter real, es decir, no se encuentra a escala. Los modelos a escala fabricados en resina fueron realizados a un 30% del tamaño obtenido a partir de este programa.

### **3.2 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA PROJECT GGV25**

*Project GGV25* sin duda, cobró gran importancia dentro de la técnica de fusión, debido primordialmente a la velocidad y confiabilidad con la que realizaba el balance de carga y ajustes adicionales durante la fusión.

*Project GGV25* básicamente es un software que tiene la capacidad y versatilidad de realizar el balance de carga inicial o teórico a partir de dos

chatarras con composición química definida cualquiera, bajo cualquier base de cálculo y permitiendo manejar una gran variedad de opciones.

La idea de crear *Project GGV25* era básicamente la de optimizar el tiempo que tomaba realizar cálculos a "mano" y con la incertidumbre de cometer posibles errores durante el cálculo del balance de carga, el ajuste necesario o una posible modificación durante el proceso de fusión.



### 3.2.1 ENTORNO GRÁFICO

Debido a la cantidad de información que maneja *Project GGV25* era imposible mostrar todo en una misma ventana, por lo que la opción adecuada fue generar una serie de TabStrip (pestañas) que contendrían al cuerpo del programa haciéndolo más dinámico. Cada TabStrip representa una etapa en el proceso de ajuste de la composición química del hierro que se fabrica, las cuales son: *zona de Datos, Balance de Carga, Ajuste Preliminar & Acerca*, Como se muestra en la figura 3.2.

**Project GGV25**

**Datos | Balance Teórico | Ajuste Preliminar | Acerca**

**Hierro Nodular Grado 100**

| Composición Química Requerida (%) |             |       | Eficiencia (%) |
|-----------------------------------|-------------|-------|----------------|
| Carbono                           | 3.50 - 3.80 | 3.65  | 94             |
| Silicio                           | 2.20 - 2.70 | 2.45  | 98             |
| Manganeso                         | 0.60 MAX    | 0.50  | 100            |
| Azufre                            | 0.015 MAX   | 0.015 | 100            |
| Fosforo                           | 0.05 MAX    | 0.05  | 100            |
| Cobre                             | 0.5 MAX     | 0.35  | 100            |

**Materia Prima**

Base de Cálculo (Kg) 35 ☐ Bloquear CH2

| Masa (Kg) | Masa (Kg) |
|-----------|-----------|
| CH1 19    | CH2 16    |

| Composición Química CH1 (%) |        | Composición Química CH2 (%) |        |
|-----------------------------|--------|-----------------------------|--------|
| Carbono                     | 3.761  | Carbono                     | 0.0503 |
| Silicio                     | 2.741  | Silicio                     | 0.0239 |
| Manganeso                   | 0.633  | Manganeso                   | 0.3167 |
| Azufre                      | 0.0222 | Azufre                      | 0.0147 |
| Fosforo                     | 0.0177 | Fosforo                     | 0.0122 |
| Cobre                       | 0.02   | Cobre                       | 0.016  |

**Composición Q. & Eficiencia**

| Comp C, Mn & Cu (%) | Eficiencia (%) |
|---------------------|----------------|
| Rec 99.9            | 95             |
| FeMn 72.2           | 100            |
| Cu 100              | 100            |

| Composición Si (%) | Eficiencia (%) |
|--------------------|----------------|
| FeSi 75            | 100            |
| FeSi (inoc) 65     | 100            |
| FeSi (Post I) 65   | 100            |
| FeSiMg 46          | 100            |
| FeSiMg 44.7        | 100            |

**Nodulizante**

|                                         | Ef (%) | Nivel | C.Q. |
|-----------------------------------------|--------|-------|------|
| <input checked="" type="radio"/> 5 % Mg | 100    | 0.02  | 5.5  |
| <input type="radio"/> 9 % Mg            | 100    | 0.07  | 8.56 |

**Inoculación (%)**

| <input checked="" type="checkbox"/> Inoculación | <input checked="" type="checkbox"/> Post Inoculación |
|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| 0.15                                            | 0.15                                                 |

**Aceptar Salir**

Figura 3.2. Entorno gráfico de Project GGV25.



### 3.2.2 MANUAL DE REFERENCIA.

La referencia que se hace a continuación, pretende describir el funcionamiento de cada una de las secciones operativas de *Project GGV25*, comenzando por la descripción, ingreso y modificación de valores en la zona de *Datos*, para continuar con el *Balance de Carga*, el *Ajuste Preliminar* y finalmente terminar en la sección de *Acerca*.

#### 3.2.2.1 ZONA DE DATOS.

Dentro de esta área se puede manipular toda la información referente al balance de carga; desde las eficiencias tanto de los elementos involucrados como la de las ferroaleaciones hasta los niveles de nodulización y porcentajes de inoculación y post-inoculación.

| Hierro Nodular Grado 100          |             |       |                |  |
|-----------------------------------|-------------|-------|----------------|--|
| Composición Química Requerida (%) |             |       | Eficiencia (%) |  |
| Carbono                           | 3.50 - 3.80 | 3.65  | 94             |  |
| Silicio                           | 2.20 - 2.70 | 2.45  | 98             |  |
| Manganeso                         | 0.60 MAX    | 0.50  | 100            |  |
| Azufre                            | 0.015 MAX   | 0.015 | 100            |  |
| Fosforo                           | 0.05 MAX    | 0.05  | 100            |  |
| Cobre                             | 0.5 MAX     | 0.35  | 100            |  |

Figura 3.3. Composición Química Requerida.

| Materia Prima               |        |                             |                                       |
|-----------------------------|--------|-----------------------------|---------------------------------------|
| Base de Cálculo (Kg)        |        | 35                          | <input type="checkbox"/> Bloquear CH2 |
| Masa (Kg)                   |        |                             |                                       |
| CH1                         | 19     | CH2                         | 16                                    |
| Composición Química CH1 (%) |        | Composición Química CH2 (%) |                                       |
| Carbono                     | 3.761  | Carbono                     | 0.0503                                |
| Silicio                     | 2.741  | Silicio                     | 0.0239                                |
| Manganeso                   | 0.633  | Manganeso                   | 0.3167                                |
| Azufre                      | 0.0222 | Azufre                      | 0.0147                                |
| Fosforo                     | 0.0177 | Fosforo                     | 0.0122                                |
| Cobre                       | 0.02   | Cobre                       | 0.016                                 |

Figura 3.4. Materia Prima

Dentro del marco (frame) *Hierro Nodular grado 100* (figura 3.3), encontramos la información referente a la composición química requerida del hierro que se desea fabricar, el cual puede ser nodular, gris, vermicular, atruchado o blanco; lo anterior dependerá a su vez de las opciones que se elijan para su fabricación, así como de la técnica de fusión. En la primera columna de esta misma sección aparecen los elementos que se integraran dentro del balance de carga; en la siguiente columna aparecen los rangos

máximos y mínimos establecidos, esta columna representa los intervalos permitidos para la composición química requerida. En la tercera columna se introduce el promedio entre los máximos y mínimos para establecer la composición química requerida promedio que será empleada para cálculos futuros. Por último, la cuarta columna como lo indica su encabezado, muestra el valor de las eficiencias que tendrán los elementos durante el proceso de fabricación.

Una vez indicada la composición química requerida se ingresa la información sobre la materia prima dentro del marco del mismo nombre (figura 3.4). Se ingresa la base de cálculo real a fabricar, así como, la cantidad de chatarra uno que será empleada, la cantidad de chatarra dos se ajustará automáticamente hasta alcanzar el valor de la base de cálculo, también puede ingresarse inicialmente la cantidad de chatarra dos, ajustándose el valor de la CH1. A continuación se ingresan los valores de composición química de ambas chatarras en sus respectivas celdas. La opción *Bloquear CH2* que se describe a continuación es opcional.

La casilla *Bloquear CH2*, es una de las actualizaciones que se fueron incorporando dentro de *Project GGV25* como resultado del mejoramiento de la técnica de fusión durante el procedimiento experimental, y permite realizar el balance de carga o ajuste de ferroaleaciones, recarburante, etc., ya que mediante el bloqueo de la chatarra dos (CH2) y al ingresar la composición química de la chatarra uno (CH1), ésta automáticamente es copiada en CH2 y no permite su alteración, ahora CH1 y CH2 son iguales, esto solo tiene sentido si se ha introducido la composición química del baño líquido y no la teórica a partir de dos chatarras, lo que significa que representa el valor de la composición química preliminar, y permite hacer el ajuste de todos los elementos (recarburante, ferroaleaciones, nodulizante, inoculación y post-inoculación) de manera más precisa. Lo anterior no quiere decir que si se consideran las composiciones de CH1 y CH2 de

manera individual y diferente sea más inexacto, solo que se está considerando un balance de carga estrictamente teórico, lo cual es adecuado si no son conocidas las cantidades de CH1 y CH2 que se deben agregar.

Dentro de la sección *Composición Q. & Eficiencia* (figura 3.5), se encuentra información sobre el contenido de carbono en el recarburante, el contenido de manganeso en el ferromanganeso y sus respectivas eficiencias, el cobre utilizado es cobre puro. Las ferroaleaciones, el nodulizante y el inoculante cuentan con un alto contenido de silicio que es indispensable contabilizar dentro del balance de carga, por lo que es necesario establecer la cantidad presente de este elemento para cada caso. Se encuentran presentes dos tipos de FeSiMg, y cada uno representa el 5% y 9% de Mg presente respectivamente, el remarcado representa la selección de nodulizante seleccionada por el usuario.

En lo que respecta al *Nodulizante* (figura 3.6), se deberá seleccionar inicialmente su tipo, ya sea el del 5% o el de 9% de Mg, así como, su eficiencia en el proceso, el nivel de magnesio a emplear y el porcentaje de magnesio presente en el nodulizante (composición química). La inoculación y la post-inoculación son procesos optativos que deberán ser considerados en la zona de *Inoculación* (figura 3.7) dependiendo del tipo de hierro a fabricar, en caso de no requerir ningún caso de inoculación, únicamente deberán ser

| Composición Q. & Eficiencia |      |                |
|-----------------------------|------|----------------|
| Comp C, Mn & Cu (%)         |      | Eficiencia (%) |
| Rec                         | 99.9 | 95             |
| FeMn                        | 72.2 | 100            |
| Cu                          | 100  | 100            |
| Composición Si (%)          |      | Eficiencia (%) |
| FeSi                        | 75   | 100            |
| FeSi (inoc)                 | 65   | 100            |
| FeSi(Post I)                | 65   | 100            |
| FeSiMg                      | 46   | 100            |
| FeSiMg                      | 44.7 | 100            |

Figura 3.5. Composición Química de Ferro-aleaciones y Recarburante

| Nodulizante |        |       |      |
|-------------|--------|-------|------|
|             | Ef (%) | Nivel | C.Q. |
| 5 % Mg      | 100    | 0.02  | 5.5  |
| 9 % Mg      | 100    | 0.07  | 8.56 |

Figura 3.6. Composición Química del Nodulizante, Nivel y Eficiencia

| Inoculación (%)                                 |                                                      |
|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> Inoculación | <input checked="" type="checkbox"/> Post Inoculación |
| 0.15                                            | 0.15                                                 |

Figura 3.7. Inoculación

inhabilitadas las casillas de verificación, de lo contrario, será necesario establecer el porcentaje de los mismos.

Una vez reunidas las opciones e información requerida en la zona de datos, se procede a computarizar dicha información dando un clic en el botón *Aceptar*. Al finalizar el cálculo del balance de carga, será visualizado dentro de la zona del *Balance de Carga*, que corresponde a la segunda TabStrip del entorno gráfico.

### 3.2.2.2 BALANCE DE CARGA

Los resultados del balance de carga son mostrados mediante una serie de tablas (figura 3.8), cada una de ella representa una etapa dentro del balance de carga. La tabla C. *Química Requerida*, muestra la información ingresada por el usuario en porcentaje y masa. Las tablas CH1 y CH2 muestran lo elementos aportados por las chatarras uno y dos respectivamente, así como CH1 + CH2 la suma de las mismas.

Project GGY25

Datos Balance Teórico | Ajuste Preliminar | Acerca |

Elementos Aportados por las Chatarras

| C. Química Requerida |              |       | CH1       |              |        | CH2       |              |        |
|----------------------|--------------|-------|-----------|--------------|--------|-----------|--------------|--------|
| Elemento             | Cantidad (g) | %     | Elemento  | Cantidad (g) | %      | Elemento  | Cantidad (g) | %      |
| Carbono              | 1359.043     | 3.65  | Carbono   | 827.42       | 2.364  | Carbono   | 6.539        | 0.019  |
| Silicio              | 875          | 2.45  | Silicio   | 603.02       | 1.723  | Silicio   | 3.107        | 0.009  |
| Manganeso            | 175          | 0.5   | Manganeso | 139.26       | 0.398  | Manganeso | 41.171       | 0.118  |
| Azufre               | 5.25         | 0.015 | Azufre    | 4.884        | 0.014  | Azufre    | 1.911        | 0.005  |
| Fosforo              | 17.5         | 0.05  | Fosforo   | 3.894        | 0.011  | Fosforo   | 1.586        | 0.005  |
| Cobre                | 122.5        | 0.35  | Cobre     | 4.4          | 1.2571 | Cobre     | 2.08         | 5.9428 |

| CH1 + CH2 |              |        |
|-----------|--------------|--------|
| Elemento  | Cantidad (g) | %      |
| Carbono   | 833.959      | 2.383  |
| Silicio   | 606.127      | 1.732  |
| Manganeso | 180.431      | 0.516  |
| Azufre    | 6.795        | 0.019  |
| Fosforo   | 5.48         | 0.016  |
| Cobre     | 6.48         | 1.8514 |

Nodulizante 5% Mg

|                  |         |
|------------------|---------|
| Nivel            | 0.03    |
| Mg (g)           | 15.655  |
| Si en FeSiMg (g) | 130.929 |
| FeSiMg (g)       | 284.628 |

Inoculante (g)

|                  |        |
|------------------|--------|
| FeSi (Inoc)      | 80.769 |
| FeSi (Post Inoc) | 80.769 |

Ferroaleaciones (g)

|       |         |
|-------|---------|
| Rec   | 553.273 |
| FeSi  | 43.926  |
| FeMn  | -7.522  |
| Cobre | 116.02  |

Carbón Equivalente

|       |
|-------|
| 4.483 |
|-------|

Aceptar Salir

Figura 3.8. Balance de Carga



Dentro del marco *Nodulizante* (figura 3.9), y comenzando por el encabezado se muestra el tipo de nodulizante empleado; dentro de la tabla se puede ver el nivel de magnesio deseado, así como la cantidad de Magnesio total necesario en el nodulizante, que contabiliza la cantidad de magnesio que debe reaccionar con el azufre presente más la cantidad adicional de magnesio del nivel fijado ( $Mg_{Total} = Mg_{Azufre} + Mg_{Nivel}$ ). También es importante saber la cantidad de silicio que será aportado por el nodulizante y que ha sido incorporado dentro del balance. Resaltado en azul y para una mejor identificación visual se muestran las cantidades de las ferroaleaciones, recarburante y tratamientos (figura 3.8) a incorporar durante el proceso de fusión y colada.

| Nodulizante 5% Mg |         |
|-------------------|---------|
| Nivel             | 0.03    |
| Mg (g)            | 15.655  |
| Si en FeSiMg (g)  | 130.929 |
| FeSiMg (g)        | 284.628 |

Figura 3.9. Información sobre el Nodulizante

| Inoculante (g)   |        |
|------------------|--------|
| FeSi (Inoc)      | 80.769 |
| FeSi (Post Inoc) | 80.769 |

Figura 3.10. Cantidad de Inoculante

| Ferroaleaciones (g) |         |
|---------------------|---------|
| Rec                 | 553.273 |
| FeSi                | 43.926  |
| FeMn                | -7.522  |
| Cobre               | 116.02  |

Figura 3.11. Cantidad de Ferroaleaciones

Las cantidades resaltadas (figuras 3.9 a 3.11) son el resultado final del balance de carga, y por ende las que deberán ser medidas y agregadas al baño líquido.

En caso de contar con números negativos dentro del marco de las *ferroaleaciones* (figura 3.11), serán remarcadas en color rojo y el valor número negativo representa el equivalente a la ferroaleación que debería ser eliminada de las chatarras seleccionadas como materia prima, lo cuál no es posible, en otras palabras, si se obtienen valores negativos en las ferroaleaciones se está considerando una selección errónea de la materia prima, ó en su defecto de las cantidades de CH1 y CH2 por lo que será

necesario incrementar la cantidad de chatarra con menor contenido del elemento problema.

### 3.2.2.3 AJUSTE PRELIMINAR.

El ajuste preliminar puede realizarse de dos maneras. Una de ellas consiste en visualizar la "pestaña" *Ajuste Preliminar* (figura 3.12) en donde se encuentran nuevamente tres tablas: la *Composición Química Requerida*, la *Composición Química Preliminar Teórica*, y la *Composición Química Preliminar Real*. La *Composición Química Preliminar Teórica* representa los valores de los elementos en el baño líquido una vez que han sido incorporadas las ferroaleaciones y elementos como el cobre y el carbono.

Project GGV25

Datos | Balance Teórico | **Ajuste Preliminar** | Acerca |

Composición Química

| C. Química Requerida |              |       | C. Química Preliminar Teórica * |              |       | C. Química Preliminar Real |              |   |
|----------------------|--------------|-------|---------------------------------|--------------|-------|----------------------------|--------------|---|
| Elemento             | Cantidad (g) | %     | Elemento                        | Cantidad (g) | %     | Elemento                   | Cantidad (g) | % |
| Carbono              | 1359.043     | 3.65  | Carbono                         | 1359.043     | 3.65  | Carbono                    |              |   |
| Silicio              | 875          | 2.45  | Silicio                         | 534.643      | 1.497 | Silicio                    |              |   |
| Manganeso            | 175          | 0.5   | Manganeso                       | 175          | 0.50  | Manganeso                  |              |   |
| Azufre               | 5.25         | 0.015 | Azufre                          | 6.457        | 0.018 | Azufre                     |              |   |
| Fosforo              | 17.5         | 0.05  | Fosforo                         | 5.233        | 0.015 | Fosforo                    |              |   |
| Cobre                | 122.5        | 0.35  | Cobre                           | 122.5        | 0.35  | Cobre                      |              |   |

\* CQ Después de agregar ferroaleaciones

Ajuste de Carga (g)

|              |  |
|--------------|--|
| Recarburante |  |
| FeSi         |  |
| FeSiMg       |  |
| FeMn         |  |
| Cobre        |  |

Verificar

Aceptar Salir

Figura 3.12. Entorno gráfico del Ajuste Preliminar.

Es importante señalar que la C.Q. preliminar teórica no siempre debe de ser igual a la C.Q. requerida, solo serán iguales en caso de no contar con tratamientos posteriores, por lo que la tabla que contiene la *Composición Química Preliminar Teórica* será el nuevo parámetro a seguir, y el ajuste de los elementos (solo ferroaleaciones, recarburante y cobre) deberá registrarse por este nuevo parámetro.

Para realizar el ajuste de elementos es necesario ingresar la *Composición Química Preliminar Real* y dar un clic en el botón *Verificar*, *Project GGV25* comparará los valores de las composiciones y determinará si se encuentran dentro o fuera del rango establecido, de ser necesario precisará las cantidades de ferroaleaciones y recarburante a adicionar en sus respectivas celdas dentro del marco *Ajuste de Carga* así como del nodulizante.

Otro método de realizar el ajuste es mediante el reemplazo de la composición química de la materia prima por el de la composición química preliminar real mediante el bloque de CH2.

- ✓ Los colores que resaltan los contenidos de las ferroaleaciones en azul pueden variar según la configuración de video y el sistema operativo.
- ✓ El código de programación se describe en el Apéndice B



## CAPITULO IV

### 4. DESARROLLO EXPERIMENTAL.

En el presente desarrollo experimental se describe la secuencia de cálculo para el balance de carga así como el ajuste de ferroaleaciones y el tratamiento de nodulización. Así mismo, se detalla la técnica de fusión establecida para la producción, análisis y control del grafito compacto.

Los niveles teóricos de magnesio residual se ilustran en la Tabla 4.0.

Tabla 4.0. Niveles teóricos de Magnesio residual.

| Corrida | % Mg <sub>Residual</sub><br>teórico (Nivel) |
|---------|---------------------------------------------|
| 1       | 0.035                                       |
| 2       | 0.035                                       |
| 3       | 0.022                                       |
| 4       | 0.022                                       |
| 5       | 0.018                                       |

#### 4.1 MATERIAL Y EQUIPO EMPLEADO

- ✓ Hierro nodular (1) y vermicular (2 a 8) con la siguiente composición química (CH1):

|    | C       | Si      | Mn      | S       | P       | Cu      |
|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1. | 3.7610% | 2.7410% | 0.6330% | 0.0222% | 0.0177% | 0.0200% |
| 2. | 3.3763% | 2.2363% | 0.4857% | 0.0122% | 0.0117% | 0.3579% |
| 3. | 3.4417% | 2.3953% | 0.4988% | 0.0146% | 0.0118% | 0.3487% |
| 4. | 3.5213% | 2.5147% | 0.4950% | 0.0146% | 0.0146% | 0.3528% |
| 5. | 3.4653% | 2.4450% | 0.4646% | 0.0106% | 0.0151% | 0.3286% |
| 6. | 3.4737% | 2.4227% | 0.4677% | 0.0133% | 0.0161% | 0.3380% |
| 7. | 3.6060% | 2.5063% | 0.4690% | 0.0151% | 0.0139% | 0.3386% |
| 8. | 3.2660% | 2.4247% | 0.7333% | 0.0138% | 0.0115% | 0.3137% |

- ✓ Acero (CH2) de bajo carbono con la siguiente composición química:

| C       | Si      | Mn      | S       | P       | Cu     |
|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
| 0.0503% | 0.0239% | 0.3167% | 0.0147% | 0.0122% | 0.016% |

- ✓ Ferroaleaciones base silicio empleadas para el tratamiento de nodulización, con la siguiente composición química:

|    | Mg         | Si         | Ce       | Ca    | Al    |
|----|------------|------------|----------|-------|-------|
| 1. | 4.75-6.25% | 44.0-48.0% | 0.5-0.7% | 1.0%  | 0.7%  |
| 2. | 8.56%      | 44.70%     | 0.47%    | 1.27% | 0.67% |

- ✓ Recarburante con la siguiente composición química:

| Carbono | Cenizas | Azufre |
|---------|---------|--------|
| 99.8%   | 0.1%    | 0.008% |

- ✓ Ferrosilicio (FeSi), con la siguiente composición química:

| Si  | Zr | Ca   | Mn   | Al       |
|-----|----|------|------|----------|
| 65% | 5% | 1.5% | 3.5% | 1.5% Max |

- ✓ Ferromanganeso (FeMn), con la siguiente composición química:

|  | Mn   |  |
|--|------|--|
|  | 72.2 |  |

- ✓ Inoculante (FeSi), con la siguiente composición química:

| Si  | Zr | Ca   | Mn   | Al       |
|-----|----|------|------|----------|
| 65% | 5% | 1.5% | 3.5% | 1.5% Max |

- ✓ Cobre puro.
- ✓ Escorificante: silicato de sodio granulado.
- ✓ Arena de moldeo en verde (arena de reciclaje):

Los equipos empleados son:

- ✓ Espectrómetro de emisión marca espectrolab M8B.
- ✓ PC de escritorio (Project GGV25).
- ✓ Molino chileno con una capacidad de 20 Kg
- ✓ Horno de inducción de 75 KWatts, con capacidad de 100 Kg de ferrosos.
- ✓ Microscopio para metalografía.
- ✓ Analizador de imágenes.
- ✓ Balanza analítica.
- ✓ Pirómetro de inmersión.
- ✓ Molde permanente para análisis químico
- ✓ Grúa.

## 4.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA.

Las fundiciones realizadas durante el presente trabajo mantienen un rango de composición química constante, por lo tanto la composición nominal de la fundición se muestra en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Composición Química Requerida.

| Elemento | Intervalo Permitido | C. Química Promedio |
|----------|---------------------|---------------------|
| C        | 3.50% - 3.80%       | 3.65%               |
| Si       | 2.20% - 2.70%       | 2.45%               |
| Mn       | 0.6% MAX            | 0.50%               |
| S        | 0.015% MAX          | 0.015%              |
| P        | 0.05% MAX           | 0.050%              |
| Cu       | 0.5% MAX            | 0.35%               |

### 4.2.1 BALANCE DE CARGA

En la presente sección se presenta el balance de carga para obtener una fundición con 0.015% de azufre (máximo) y un nivel de 0.035 % de magnesio residual. Los balances restantes se describen en el apéndice A.

La composición química de las chatarras empleadas para el presente balance de carga se describe en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Composición Química Chatarras

| Elemento | CH1     | CH2     |
|----------|---------|---------|
| C        | 3.5040% | 0.0503% |
| Si       | 2.4290% | 0.0239% |
| Mn       | 0.4657% | 0.3167% |
| S        | 0.0139% | 0.0147% |
| P        | 0.0165% | 0.0122% |
| Cu       | 0.3382% | 0.016%  |

**CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE GRAMOS DE LOS ELEMENTOS REQUERIDOS PARA LOGRAR LA COMPOSICIÓN QUÍMICA REQUERIDA.**

La eficiencia utilizada para los elementos en un horno de inducción se basó en pruebas realizadas anteriormente, dando como resultado una eficiencia para el carbono de 89%, para el silicio de 98%, para el manganeso, fósforo, cobre y azufre del 100%. La base de cálculo fue de 35Kg.

$$\text{Gramos elemento} = \frac{(\text{Kg Carga}) \left( \frac{\text{C. Q. elemento en la chatarra}}{100\%} \right) \left( \frac{1000g}{1Kg} \right)}{\frac{\text{eficiencia}}{100\%}}$$

$$g \text{ C} = \frac{(35Kg) \left( \frac{3.65\%}{100\%} \right) \left( \frac{1000g}{1Kg} \right)}{\frac{89\%}{100\%}} = 1435.393g \text{ C}$$

$$g \text{ Si} = \frac{(35Kg) \left( \frac{2.45\%}{100\%} \right) \left( \frac{1000g}{1Kg} \right)}{\frac{98\%}{100\%}} = 875g \text{ Si}$$

$$g \text{ Mn} = \frac{(35Kg) \left( \frac{0.5\%}{100\%} \right) \left( \frac{1000g}{1Kg} \right)}{\frac{100\%}{100\%}} = 175g \text{ Mn}$$

$$g \text{ S} = \frac{(35Kg) \left( \frac{0.015\%}{100\%} \right) \left( \frac{1000g}{1Kg} \right)}{\frac{100\%}{100\%}} = 5.25g \text{ S}$$

$$g P = \frac{(35Kg) \left( \frac{0.05\%}{100\%} \right) \left( \frac{1000g}{1Kg} \right)}{\frac{100\%}{100\%}} = 17.5g P$$

$$g Cu = \frac{(35Kg) \left( \frac{0.35\%}{100\%} \right) \left( \frac{1000g}{1Kg} \right)}{\frac{100\%}{100\%}} = 122.5g Cu$$

**CALCULO DE LOS GRAMOS DE LOS ELEMENTOS QUE APORTA CADA CHATARRA, EN FUNCIÓN DE LOS KILOGRAMOS QUE SE ALIMENTAN AL HORNO DE INDUCCIÓN.**

Las cantidades de chatarra 1 (CH1) y chatarra 2 (CH2) fijadas en 23 y 12Kg respectivamente se establecieron a partir de fundiciones previas (de prueba y estandarización) por la baja cantidad de materia prima de (acero).

Para calcular los kilogramos aportados por los elementos no es tomada en cuenta la eficiencia por lo tanto el cálculo se realiza de la siguiente manera:

$$\text{Gramos elemento} = (Kg \text{ Carga CH}) \left( \frac{\text{C. Q. elemento en la chatarra}}{100\%} \right) \left( \frac{1000g}{1Kg} \right)$$

Para la Chatarra #1. (CH1: Hierro)

$$g C = (23Kg) \left( \frac{3.5040\%}{100\%} \right) \left( \frac{1000g}{1Kg} \right) = 805.92g C$$

$$g Si = (23Kg) \left( \frac{2.429\%}{100\%} \right) \left( \frac{1000g}{1Kg} \right) = 558.67g Si$$

$$g \text{ Mn} = (23Kg) \left( \frac{0.4657\%}{100\%} \right) \left( \frac{1000g}{1Kg} \right) = 107.111g \text{ Mn}$$

$$g \text{ S} = (23Kg) \left( \frac{0.0139\%}{100\%} \right) \left( \frac{1000g}{1Kg} \right) = 3.197g \text{ S}$$

$$g \text{ P} = (23Kg) \left( \frac{0.0165\%}{100\%} \right) \left( \frac{1000g}{1Kg} \right) = 3.795g \text{ P}$$

$$g \text{ Cu} = (23Kg) \left( \frac{0.3382\%}{100\%} \right) \left( \frac{1000g}{1Kg} \right) = 77.786g \text{ Cu}$$

Para la Chatarra #2 (CH2: Acero)

$$g \text{ C} = (12Kg) \left( \frac{0.0503\%}{100\%} \right) \left( \frac{1000g}{1Kg} \right) = 6.036g \text{ C}$$

$$g \text{ Si} = (12Kg) \left( \frac{0.0239\%}{100\%} \right) \left( \frac{1000g}{1Kg} \right) = 2.868g \text{ Si}$$

$$g \text{ Mn} = (12Kg) \left( \frac{0.3167\%}{100\%} \right) \left( \frac{1000g}{1Kg} \right) = 38.004g \text{ Mn}$$

$$g \text{ S} = (12Kg) \left( \frac{0.0147\%}{100\%} \right) \left( \frac{1000g}{1Kg} \right) = 1.764g \text{ S}$$

$$g \text{ P} = (12Kg) \left( \frac{0.0122\%}{100\%} \right) \left( \frac{1000g}{1Kg} \right) = 1.464g \text{ P}$$



$$g \text{ Cu} = (12 \text{ Kg}) \left( \frac{0.016\%}{100\%} \right) \left( \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ Kg}} \right) = 1.92 \text{ g Cu}$$

**CÁLCULO DE LOS GRAMOS QUE APORTAN LAS DOS CHATARRAS PARA CADA ELEMENTO (TABLA 4.3).**

Chatarra 1 + Chatarra 2 = Kg que aportan ambas chatarras.

Tabla 4.3. Elementos Aportados por las dos chatarras

| Elemento | CH1       | CH2      | CH1 + CH2 |
|----------|-----------|----------|-----------|
| C        | 805.92 g  | 6.036 g  | 811.956 g |
| Si       | 558.67 g  | 2.868 g  | 561.538 g |
| Mn       | 107.111 g | 38.004 g | 145.115 g |
| S        | 3.197 g   | 1.764 g  | 4.961 g   |
| P        | 3.795 g   | 1.464 g  | 5.259 g   |
| Cu       | 77.786 g  | 1.92 g   | 79.706 g  |

**CÁLCULO DE LOS GRAMOS DE RECARBURANTE Y LAS FERROALEACIONES QUE SE DEBERÁN AGREGAR AL BAÑO LÍQUIDO PARA AJUSTAR LA COMPOSICIÓN QUÍMICA.**

$g_{\text{requeridos}} - g_{\text{aportados por las chatarras}} = g \text{ a adicionar por elemento.}$

$$(g \text{ elemento}) \left( \frac{100\%}{C.Q.} \right) \left( \frac{100\%}{\text{eficiencia}} \right) = g \text{ Ferroaleación}$$

Recarburante:

$$1435.393 - 811.956 = 623.437 \text{ g C}$$

$$(623.437 \text{ g C}) \left( \frac{100\% \text{ Rec}}{99.9\% \text{ C}} \right) \left( \frac{100\%}{94\%} \right) = g \text{ 663.895 Rec}$$

Ferromanganeso:

$$175-145.115=29.885 \text{ g Mn}$$

$$(29.885 \text{ g Mn}) \left( \frac{100\% \text{ FeMn}}{72.2\% \text{ Mn}} \right) \left( \frac{100\%}{100\%} \right) = 41.392 \text{ g FeMn}$$

Cobre:

$$122.5-79.706=42.794 \text{ g Cu}$$

$$(42.794 \text{ g Cu}) \left( \frac{100\% \text{ Cu}}{100\% \text{ Cu}} \right) \left( \frac{100\%}{100\%} \right) = 42.794 \text{ g Cu}$$

La estimación de silicio se realiza a partir de la composición preliminar, la cual se obtiene antes de realizar el tratamiento de nodulización, así mismo, con ella se verifica que la composición química se encuentre dentro del intervalo de composición requerida.

Los resultados de los balances de carga para las corridas restantes se presentan en el Apéndice A.

### COMPOSICIÓN QUÍMICA PRELIMINAR.

Con la composición química preliminar (Tabla 4.4) se realizan los cálculos adicionales para ajustar los elementos a la composición química requerida. Así mismo, se determinan las cantidades de nodulizante e inoculantes requeridos.

Tabla 4.4. Composición Química Preliminar

| Elemento | C. Química Preliminar |
|----------|-----------------------|
| C        | 3.753                 |
| Si       | 1.694                 |
| Mn       | 0.506                 |
| S        | 0.0293                |
| P        | 0.0149                |
| Cu       | 0.3496                |
| Mg       | < 0.0050%             |

**CÁLCULO DE LOS GRAMOS DE FeSiMg NECESARIOS PARA OBTENER UNA FUNDICIÓN VERMICULAR CON 0.035% Mg RESIDUAL.**

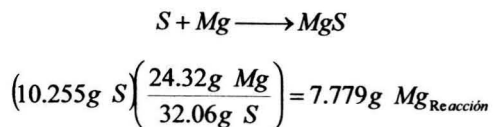
Se calcula la cantidad de magnesio reaccionante en función del azufre presente en la C. Q. Preliminar.

**GRAMOS DE AZUFRE DE LA COMPOSICIÓN PRELIMINAR.**

$$g S = (Kg \text{ Carga}) \left( \frac{\%S}{100\%} \right) \left( \frac{1000g}{1Kg} \right)$$

$$(35Kg) \left( \frac{0.0293\%}{100\%} \right) \left( \frac{1000g}{1Kg} \right) = 10.255g S$$

**CÁLCULO DEL MAGNESIO QUE REACCIONA ESTEQUEOMETRICAMENTE CON EL AZUFRE.**



**CÁLCULO DE LOS GRAMOS DE MAGNESIO REQUERIDOS PARA OBTENER UN  $Mg_{residual}$  DE 0.035%.**

$$(Kg \text{ Carga}) \left( \frac{\text{Nivel } Mg}{100\%} \right) \left( \frac{1000g}{1Kg} \right) = g \text{ } Mg_{Nivel}$$

$$(35Kg) \left( \frac{0.035\% Mg}{100\%} \right) \left( \frac{1000g}{1Kg} \right) = 12.25g \text{ } Mg_{Nivel}$$

**CÁLCULO DEL MAGNESIO REQUERIDO.**

$$g \text{ } Mg_{Add \text{ Total}} = g \text{ } Mg_{Reacción} + g \text{ } Mg_{Nivel}$$

$$7.779 + 12.25 = 20.029g \text{ } Mg_{Add \text{ Total}}$$

**CÁLCULO DEL FERROSILICIOMAGNESIO (FeSiMg5%) NECESARIO.**

La ferroaleación contiene 5% de Mg y se considera una eficiencia del 100%.

$$g \text{ } FeSiMg = (g \text{ } Mg_{Add \text{ Total}}) \left( \frac{100\% FeSiMg}{C.Q. \text{ } Mg} \right)$$

$$(20.029g \text{ } Mg_{Add \text{ Total}}) \left( \frac{100\% FeSiMg}{5.5\% Mg} \right) = 364.163g \text{ } FeSiMg$$

**CÁLCULO DE SILICIO QUE APORTA EL NODULIZANTE (FeSiMg).**

$$g \text{ } Si \text{ aportados por } FeSiMg = (g \text{ } FeSiMg) \left( \frac{C.Q. \text{ } Si}{100\% FeSiMg} \right)$$

$$(364.163g \text{ } FeSiMg) \left( \frac{46g \text{ } Si}{100g FeSiMg} \right) = 167.51g \text{ } Si_{FeSiMg}$$

**SILICIO EN LA COMPOSICIÓN QUÍMICA PRELIMINAR.**

$$g \text{ Si}_{C.Q.P.} = (Kg \text{ Carga}) \left( \frac{C.Q.P. \text{ Si}}{100\%} \right) \left( \frac{1000g}{1Kg} \right)$$

$$(35Kg) \left( \frac{1.694 \%Si}{100\%} \right) \left( \frac{1000g}{1Kg} \right) = 592.9g \text{ Si}_{C.Q.P.}$$

**CÁLCULO DEL SILICIO QUE APORTAN LA INOCULACIÓN (0.015%) Y LA POST-INOCULACIÓN (0.015%), ASÍ COMO, DE FeSi INOCULANTE Y POST-INOCULANTE NECESARIO.**

$$g \text{ Si}_{INOC} = (Kg \text{ Carga}) \left( \frac{Nivel \text{ INOC}}{100\%} \right) \left( \frac{1000g}{1Kg} \right)$$

$$(35Kg) \left( \frac{0.15\%}{100\%} \right) \left( \frac{1000g}{1Kg} \right) = 52.5g \text{ Si}_{INOC}$$

$$(35Kg) \left( \frac{0.15\%}{100\%} \right) \left( \frac{1000g}{1Kg} \right) = 52.5g \text{ Si}_{POST-INOC}$$

$$g \text{ FeSi}_{INOC} = (g \text{ Si}_{INOC}) \left( \frac{100\% \text{ FeSi INOC}}{C.Q. \text{ Si}} \right) \left( \frac{1000g}{1Kg} \right)$$

$$(52.5g \text{ Si}_{INOC}) \left( \frac{100\% \text{ FeSi INOC}}{65\% \text{ Si}} \right) = 80.769g \text{ FeSi}_{INOC}$$

$$(52.5g \text{ Si}_{POST-INOC}) \left( \frac{100\% \text{ FeSi INOC}}{65\% \text{ Si}} \right) = 80.769g \text{ FeSi}_{POST-INOC}$$

**CÁLCULO DE FERROSILICIO (FeSi) REQUERIDO.**

$$g \text{ Si}_{\text{Faltantes}} = g \text{ Si}_{\text{C.Q.R.}} - g \text{ Si}_{\text{C.Q.P.}} - g \text{ Si}_{\text{FeSiMg}} - g \text{ Si}_{\text{INOC}} - g \text{ Si}_{\text{POST-INOC}}$$

$$g \text{ FeSi} = (g \text{ Si}) \left( \frac{100\% \text{ FeSi}}{\text{C.Q. Si}} \right)$$

$$875g_{\text{CQR}} - 592.9g_{\text{CQP}} - 167.515g_{\text{FeSiMg}} - 52.5g_{\text{Inoc}} - 52.5g_{\text{Post-Inoc}} = 9.585g \text{ Si}_{\text{Faltantes}}$$

$$(9.585g \text{ Si}) \left( \frac{100\% \text{ FeSi}}{75\% \text{ Si}} \right) = 12.78g \text{ FeSi}$$

### **4.3 TÉCNICA DE FUSIÓN.**

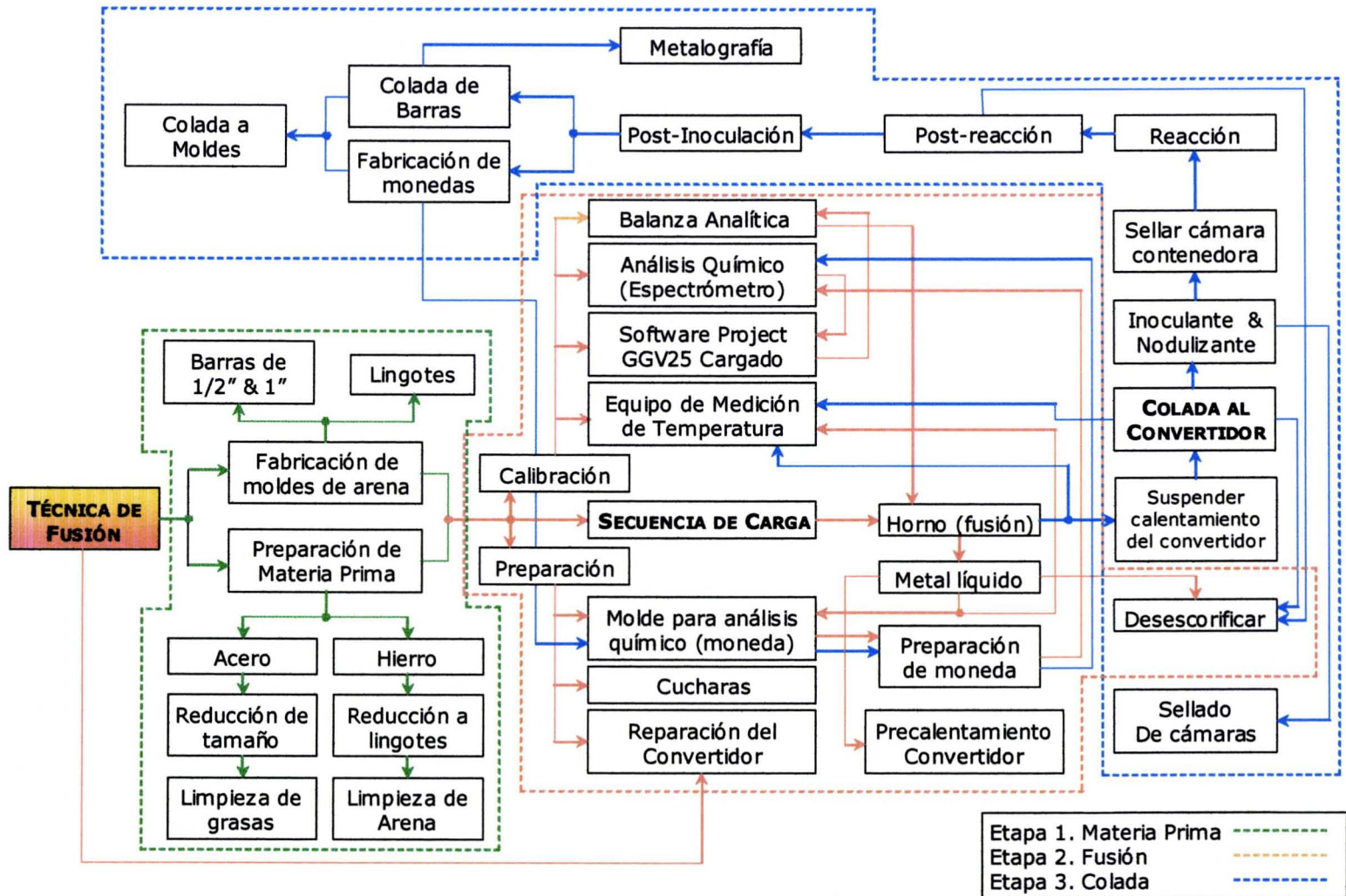
La técnica de fusión es básicamente el procedimiento experimental a seguir para la fabricación de un hierro vermicular (o cualquier otro) e indica las etapas, procedimientos, procesos y características inherentes del material que se fabrica. La presente técnica de fusión se desarrolló, adecuó y perfeccionó conforme a las necesidades y funciones que requirió cada proceso.

Debido a la variedad de procesos y actividades, se han clasificado y agruparon en tres amplias categorías: ETAPA 1: MATERIA PRIMA Y MOLDES, ETAPA 2: FUSIÓN, y ETAPA 3: COLADA. En la primera etapa, se agrupan la preparación de arena para moldeado en verde, la elaboración de moldes y la limpieza y reducción de tamaño de la materia prima. Dentro de la segunda etapa, se contempló el desarrollo de la fusión del metal, el análisis químico, el ajuste de la composición química entre otros. Finalmente la tercera etapa admite lo referente a la colada, tratamientos del metal y análisis metalográfico.

Los procesos inherentes a la fusión se caracterizan principalmente por su función y la etapa en que se encuentran, aunque algunos de ellos se encuentran involucrados en más de una etapa como se puede apreciar en el diagrama de flujo (Esquema 4.1).

A continuación se presenta una descripción sobre cada una de las etapas, procesos y funciones; las cuales están comprendidas en el diagrama de flujo; es importante mencionar que el orden en la descripción de actividades no es estrictamente cronológico, por lo que es necesario referirse al diagrama de flujo para identificar las entradas y salidas (conexiones) con las que cuentan los procesos involucrados.

#### ESQUEMA 4.1. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA TÉCNICA DE FUSIÓN





### **4.3.1 ETAPA 1: MATERIA PRIMA Y MOLDES**

Debido a la gran carga de trabajo y tiempo que requiere la etapa de fusión, era indispensable contar con la suficiente materia prima lista para las corridas experimentales, así como, el número de moldes de arena adecuado para cada fusión.

#### **4.3.1.1 PREPARACIÓN DE MATERIA PRIMA.**

La preparación de la materia prima es fundamental dentro de la técnica de fusión, ya que las chatarras empleadas deben de poseer el tamaño adecuado y deben de encontrarse libres de posibles restos de arena, óxidos, grasas u otros elementos que contaminen el metal líquido. Se contó con 2 tipos de de materias primas: hierro y acero, lo que implica diferentes procesos de limpieza y selección.

- ✓ Acero. Se empleó tubo de acero de bajo carbono que presentó grasas en toda su superficie. Debido a su longitud fue necesario seccionarlos con un esmeril con disco de corte en fragmentos de aproximadamente 25 a 40 cm. de largo (Figura 4.1). Para eliminar la grasa de los tubos fue necesario someterlos a un proceso de quemado, dejando cenizas como residuos.
- ✓ Hierro. Se emplearon hierros nodulares y vermiculares como materia prima, provenientes de fusiones anteriores, por lo que fue necesario eliminar restos de arena incrustada, además, los hierros utilizados se encontraban en series de lingotes, fue necesario fragmentarlos a bloques individuales para facilitar la entrada de los mismos en el horno.



Figura 4.1. Tubo de acero.

#### **4.3.1.2 FABRICACIÓN DE MOLDES DE ARENA.**

Es indispensable contar con moldes suficientes para la colada de las barras para el análisis metalográfico, así como, de lingoteras para el metal sobrante.

Los moldes fueron realizados con arena para fundición con una humedad aproximada de 4.0 %. La mezcla de arena con agua se realizó en un molino y con un tiempo de permanencia de tres minutos.

- ✓ Lingotes. La compactación de los moldes se realizó de manera manual con una apisonadora de aire a presión, dejando 4 x 3 lingotes por molde. Se fabricaron tres moldes de este tipo por cada fusión (Figura 4.3).
- ✓ Barras. Se fabricaron barras de media y una pulgada de diámetro. La compactación de este tipo de moldes se realizó de manera manual mediante el uso de un martillo de goma con el apoyo de extensiones de madera. Por cada fusión fue necesario contar con al menos una barra de cada diámetro (Figura 4.4).



Figura 4.3. Fabricación de lingotera de arena.



Figura 4.4. Fabricación de molde de arena para barras

#### **4.3.2 ETAPA 2: FUSIÓN.**

La etapa de fusión comienza con la secuencia de carga del horno, el arranque de la torre de enfriamiento y el encendido del horno de inducción. Por razones de seguridad, se dejó el horno en potencia reducida por período inicial de 15 a 20 minutos, posteriormente se incrementó la potencia a 35 KWatts con un tiempo de permanencia de 20 minutos, al término, se incrementó la potencia hasta alcanzar un valor de entre 40 y 60 KWatts.

##### **4.3.2.1 SECUENCIA DE CARGA.**

Los lingotes de hierro y el tubo de acero que conforman la materia prima, fueron pesados de acuerdo a los resultados arrojados por el balance de carga. Los lingotes de hierro fueron los primeros en ser introducidos al horno de inducción acomodándolos de manera que quedaran lo más compacto posible, dejando el menor espacio libre entre ellos. El tubo de acero se colocó arriba de los lingotes de hierro. Como no es posible ingresar todo el tubo de acero por lo aparatoso del mismo (Figura 4.5), conforme se fue fundiendo el metal, se agregó el material restante de acero.

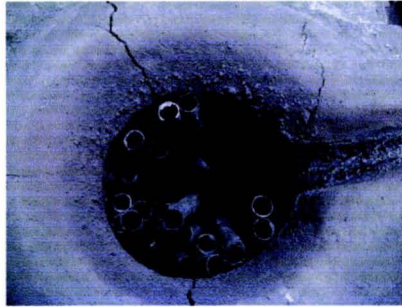


Figura 4.5. Horno de Inducción cargado.

El metal sólido, tardó aproximadamente una hora y media en fundirse por completo (desde el arranque del horno), durante este tiempo se prepararon y calibraron los siguientes equipos y herramientas.

#### **4.3.2.2 CALIBRACIÓN Y PREPARACIÓN.**

Fue indispensable contar con el personal y la materia prima para el desarrollo de las corridas experimentales, pero la realización de las fusiones no hubiera sido posible de no haber contado con el equipo y las herramientas adecuadas. Por lo anterior, fue necesario tomar en cuenta las siguientes consideraciones.

- ✓ Balanza analítica. Fue colocada cerca de la zona de ferro-aleaciones y se aseguró que se encontrara en una superficie plana horizontal.
- ✓ Espectrómetro de Chispa. Se verificó que se encontrara la mesa para hierros, así como, su respectivo programa (Fe-22).

- ✓ Software Project GGV25. Se confirmó que el programa operara correctamente, así como, se especificaron las condiciones para el balance de carga.
- ✓ Equipo de Medición de Temperatura. Se colocó en posición el equipo de medición de temperatura y se revisaron que los termopares estuvieran nuevos o en buenas condiciones.
- ✓ Molde para análisis químico. El molde fue limpiado de cenizas, exceso de pintura y otros residuos, posteriormente se cubrió con una pintura a base de zirconio con la finalidad de protegerlo.
- ✓ Cucharillas Metálicas. Fueron recubiertas con refractario moldeable y pintura de zirconio para evitar por un lado que se fundan y por el otro que contaminen en el metal que transportan, ya que las cucharillas metálicas fueron empleadas en la toma de muestra de metal líquido. Se utilizaron dos tipos de cucharillas metálicas, una mediante la cual se tomó la muestra del horno para la elaboración de monedas para análisis químico y otra, de mayor tamaño para la fabricación de barras en moldes de arena. Ambas cucharillas fueron fabricadas a partir de hierro gris y blanco reciclado.
- ✓ Reparación del Convertidor. Previo a cada fusión se revisó que el refractario del reactor se encontrara en buenas condiciones, así como, se verificó que no existieran residuos de metal en el área de sellado de las tapas, de lo contrario fue necesario retirar los residuos y restaurar las superficies dañadas. Una inadecuada limpieza y restauración pueden provocar fugas del reactor durante el tratamiento de nodulización.

#### **4.3.2.3 HORNO (METAL LÍQUIDO)**

Una vez líquido el metal; intervinieron una serie de procesos adicionales tales como descorificar el baño líquido, determinar la composición química para calcular la cantidad de ferroaleaciones, recarburante y su posterior adición, así como, la determinación del tratamiento de inoculación, nodulización y post-inoculación. También fue necesario revisar periódicamente la temperatura para evitar por un lado que se quemen los elementos presentes, y por el otro evitar que solidifique el metal líquido.

#### **4.3.2.4 LIMPIEZA DEL METAL LÍQUIDO.**

La materia prima, a pesar de haber pasado por un proceso de limpieza aún lleva consigo una pequeña cantidad de arena e impurezas que flotan en el metal líquido en forma de escoria al igual que el refractario que se va desprendiendo del horno por la acción del desgaste, por lo que fue necesario removerla mediante el uso de silicato de sodio granulado (escorificante). El escorificante tiene la característica de aglutinar a la escoria y no al metal, por lo que al momento de agregarlo sobre el baño líquido se esparce y genera una nata la cual es de fácil remoción con el uso de una varilla.

#### **4.3.2.5 MOLDE PARA ANÁLISIS QUÍMICO.**

Se tomó una muestra de metal con una cucharilla metálica, la cual se vertió dentro del molde permanente (Figura 4.6), donde la moneda solidifica y es retirada para ser enfriada con agua. Es importante que durante la



colada de la moneda la temperatura del metal no fuera muy elevada, ya que podía provocar poros en ella.



Figura 4.6. Obtención de moneda para análisis químico

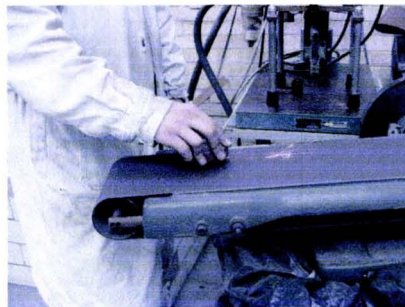


Figura 4.7. Pulido de la moneda.

#### **4.3.2.6 PREPARACIÓN DE LA MONEDA PARA ANÁLISIS QUÍMICO.**

El proceso de preparación consistió en eliminar el metal sobrante de la moneda fijando firmemente la moneda a un “banco” donde fue tronada mediante impacto. Posteriormente se pulió (Figura 4.7) hasta que la superficie se encontrara libre de poros e impurezas; en caso de que la moneda presentara irregularidades excesivas o una alta densidad de poros, se prosiguió con la fabricación de otra moneda. Finalmente fue identificada (rotulada) y llevada al espectrómetro para realizar el análisis químico.

#### **4.3.2.7 ESPECTRÓMETRO DE CHISPA.**

Mediante el uso del espectrómetro se realizó el análisis de la composición química (Figura 4.8). La secuencia en la toma de muestras fue la siguiente: C.Q.F. 1, C.Q.F. 2, C.Q.V., C.Q.F. 1, C.Q.F. 2 y C.Q.F. 3, donde el C.Q.F. 1 nos indica la composición química inicial del acero y el hierro (materia prima) en el baño líquido y mediante el cual se realiza el balance

de carga para conocer las cantidades de ferroaleaciones necesarias. La C.Q.F. 2 verifica la incorporación de los elementos aleantes al baño líquido, El C.Q.V. indica la composición química preliminar justo antes de vaciar el metal al convertidor de doble cámara y previo al tratamiento de nodulización del metal. Las composiciones químicas finales 1, 2 y 3 son el resultado del muestreo de la composición química después del tratamiento de nodulización e inoculación. Es importante señalar que los moldes de las barras cuentan con una cierta cantidad de  $\text{FeSi}_{\text{Inoc}}$ , el cual actúa como post-inoculante, por lo que la C.Q.F. 2 presentará un ligero incremento en la cantidad de silicio.

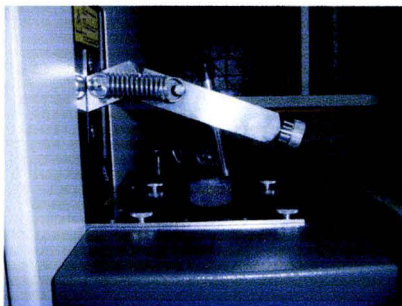


Figura 4.8. Análisis Químico.

#### 4.3.2.8 SOFTWARE PROJECT GGV25.

El balance de carga fue realizado con la información aportada por el espectrómetro y mediante el empleo del programa *Project GGV25*.

La C.Q.F. 1 fue la composición química inicial que se ingresó en el programa, como respuesta o salida se obtiene toda la información referente a la cantidad de ferroaleantes, recarburante, nodulizante, inoculante, etc. Para verificar la incorporación de los elementos aleantes y en especial la cantidad de carbono presente en el baño líquido, fue preciso tomar una



muestra adicional (C.Q.F. 2). En caso de que el baño se encontrara fuera de la Composición Química Requerida, se ejecutó un segundo balance en función de la nueva composición, así como, la adición del elemento o los elementos faltantes. Una vez lo anterior, se recolectó la muestra testigo (C.Q.V.), que representa la composición química con la que salió el metal líquido del horno justo antes del tratamiento de nodulización.

El manual de referencia de *Project GGV25* se encuentra resumido en el capítulo III.

#### **4.3.2.9 BALANZA ANALÍTICA.**

El uso de la balanza analítica permitió realizar las mediciones de las cantidades necesarias de ferroaleaciones, recarburante, FeSi inoculante, nodulizante, etc. Es importante resaltar que la balanza analítica debe de localizarse cerca de los materiales a pesar, para evitar perdidas de tiempo en los trayectos.

#### **4.3.2.10 MEDICIÓN DE TEMPERATURA.**

Una vez líquido el metal, es primordial conocer y mantener controlada la temperatura de trabajo en el horno (Figura 4.9), así como, la temperatura de vaciado al convertidor, la temperatura de inicio del tratamiento de nodulización (Figura 4.10) y la temperatura de colada.

La medición de temperatura se realizó mediante la utilización de un termopar de inmersión tipo k conectado a un indicador de temperaturas, mientras que el control de la temperatura en el horno se efectuó por razón de incrementar ó disminuir la potencia.



Figura 4.9. Lectura de la temperatura en el horno de inducción.



Figura 4.10. Lectura de la temperatura en el convertidor de doble cámara.

#### **4.3.2.11 PRECALENTAMIENTO DEL CONVERTIDOR.**

El precalentamiento del reactor (previa reparación) se realizó antes de agregar las ferroaleaciones en el horno, lo anterior, para garantizar que se encontrara suficientemente caliente al momento de realizar el tratamiento de nodulización y evitar así una eventual solidificación en alguna de las cámaras.

El convertidor fue montado en la zona de recepción de metal (junto al horno) con el quemador y su respectivo escudo.

Se normalizó el flujo de aire y gas del quemador para evitar que se ahogaran las llamas, conjuntamente se aseguró un adecuado calentamiento; Así mismo se verificó que los sellos (de material refractario) de las tapas del convertidor se encontraran en buen estado, de lo contrario fue necesario elaborar algunos extras.

### **4.3.3 ETAPA 3: COLADA**

Antes de iniciar la etapa 3 fue indispensable asegurarse de lo siguiente:

1. Composición química del baño líquido correcta.
2. Convertidor de doble cámara en condiciones óptimas
3. El convertidor ha estado bajo precalentamiento al menos por un periodo de 20 minutos.
4. Existen suficientes moldes de arena.
5. Se encuentran pesados y ubicados los tratamientos de inoculación, nodulización y post-inoculación.

Comprobado lo anterior, se realizó un repaso sobre los puestos que desempeñará el personal involucrado en la fusión, esto con la finalidad de evitar caer en errores y disipar las dudas sobre el proceso, ya que sin duda, esta etapa requiere de la perfecta concentración y coordinación del trabajo en equipo.

La 3ª etapa comenzó con la colocación de la grúa en posición para bascular el horno, en caso de encontrar aún escoria, ésta fue retirada del baño líquido, seguida de la última toma de muestra de metal (C.Q.V.) así como la lectura de temperatura (temperatura de vaciado).

#### **4.3.3.1 SUSPENSIÓN DEL PRECALENTAMIENTO.**

La suspensión del precalentamiento del convertidor se realizó de manera simultánea con el levantamiento de la grúa que bascula al horno. Al mismo tiempo se retiró el quemador junto con su escudo del área de trabajo, para facilitar la movilidad del reactor y evitar accidentes.

Las cámaras fueron tapadas para evitar pérdidas de calor, aunque no fueron selladas en este proceso (Figura 4.11).



Figura 4.11. Tapado de Cámaras



Figura 4.12. Ingreso del metal líquido en el convertidor

#### 4.3.3.2 INGRESO DEL METAL LÍQUIDO AL CONVERTIDOR.

La grúa fue levantada permitiendo el ingreso del metal líquido a la cámara contenedora (Figura 4.12), el total del material fundido ingresó al convertidor cuidando que no pasara a la cámara de reacción. Antes de finalizar la descarga del horno fue necesario disminuir la potencia del horno al mínimo (potencia reducida) para la realización de la siguiente *secuencia de carga* o en su defecto fue apagado.

Ya contenido el metal en el convertidor, Se revisó el refractario del horno y de ser necesario se retiró la escoria presente dentro de él. Posteriormente fue regresado a su posición original; la grúa se retiró rápidamente y fue enganchada al reactor. El tiempo de reinstalación de la grúa del horno al convertidor es de aproximadamente tres minutos máximo, por lo que este tiempo fue aprovechado para limpiar el baño líquido de escoria así como para realizar la lectura de temperatura. Al momento de tener sujeta la grúa al convertidor, éste fue dirigido hacia la zona de reacción ubicada en una área despejada sobre la arena.

#### 4.3.3.3 SELLADO DE LAS CÁMARAS.

Una vez ubicado el reactor en la zona de trabajo, se ingresó el inoculante y el nodulizante dentro de la cámara de reacción, se colocó el sello, la tapa y fue perfectamente cerrado para evitar fugas de material. La temperatura del baño líquido fue constantemente vigilada hasta que se alcanzó la temperatura de tratamiento, luego fue perfectamente cerrada la cámara contenedora con su sello y tapa respectivos (Figura 4.13).



Figura 4.13. Colocación del sello y tapado de ambas cámaras

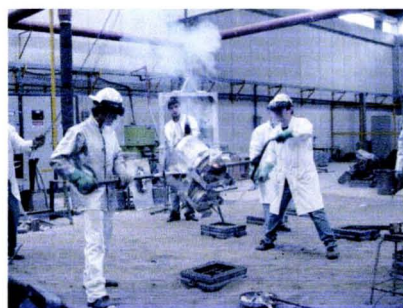


Figura 4.14. Reacción del metal líquido con el nodulizante.

#### 4.3.3.4 REACCIÓN.

El reactor se giró permitiendo el ingreso de metal a la cámara de reacción (Figura 4.14) provocando el contacto con el nodulizante y el inoculante en dicha cámara. El tiempo estimado de reacción fue de un minuto, manteniendo cierto nivel de agitación en el baño líquido de manera manual al realizar movimientos oscilatorios con los manerales del reactor. Al finalizar el tiempo de reacción, el reactor fue girado nuevamente hasta alcanzar su posición original para retirar la tapa de la cámara de reacción. La tapa de la cámara contenedora permanece en su sitio para evitar pérdidas de calor.



#### 4.3.3.5 POST-REACCIÓN.

El retiro de la tapa de reacción se realizó con precaución para evitar dañar el sello. Inmediatamente después fue medida y registrada la temperatura del baño líquido para establecer la temperatura de colada a moldes (Figura 4.15).

Por otro lado, el metal líquido se inspeccionó para detectar la presencia de escoria y su pertinente remoción (Figura 4.16).



Figura 4.15. Detección de la temperatura de colada en la cámara de reacción.



Figura 4.16. Remoción de escoria.

#### 4.3.3.6 POST-INOCULACIÓN.

La post-inoculación tuvo como objetivo incrementar el posible efecto disminuido de la inoculación realizada en el convertidor. Una parte de la cantidad de ferrosilicio estimada para la post-inoculación fue depositada dentro de los moldes de arena, la cantidad restante fue cernida sobre el chorro de metal durante la colada en los moldes. Al igual que la inoculación, la post-inoculación tiene como objetivo promover la nucleación heterogénea

para así obtener una distribución de tamaño de grafito uniforme en toda la matriz, así mismo, evita la formación de la fase cementita.

#### 4.3.3.7 COLADA DE BARRAS

En una cucharilla metálica previamente precalentada (en el horno), se vertió el metal líquido del convertidor, el cual fue colado sobre los moldes de arena (lingoteras), esto proceso se realizó dos o tres veces para incrementar y asegurar el calentamiento de la cucharilla (Figura 4.17), realizado lo anterior, fue recibido el metal en la cucharilla para ser colado en los moldes de barras con su respectiva post-inoculación (Figura 4.18).



Figura 4.17. Calentamiento de cucharilla.



Figura 4.18. Colada de Barras.

#### 4.3.3.8 FABRICACIÓN DE MONEDAS

El tratamiento de nodulización y ajustes de composición química han terminado para el metal líquido, por lo que se procedió a la toma de muestras para la fabricación de monedas y determinar la composición química final del hierro fabricado, dando lugar a la C.Q.F. 1, C.Q.F. 2 y C.Q.F. 3, de las cuales la C.Q.F. 2 destaca de las otras dos por haber recibido la post-inoculación.

#### 4.3.3.9 COLADA A MOLDES

Al finalizar la fabricación de las barras y las monedas, el metal líquido presente aún en el convertidor fue colado en las lingoteras de arena. Una vez vacío fue limpiado de restos de escoria y metal solidificado en las bocas de las cámaras.



Figura 4.19. Colada en moldes de arena.



Figura 4.20. Limpieza de la cámara de reacción.

#### 4.3.3.10 METALOGRAFÍA

Las barras fueron extraídas de los moldes y enfriadas en agua, subsiguientemente se limpiaron de partículas de arena mediante la utilización de un cepillo de alambre y lijas; luego fueron llevadas a la máquina de corte, donde fueron seccionadas de manera transversal y en tamaños de muestra manipulables, además las muestras generadas, así como las barras fueron identificadas mediante leyendas que incluían fecha de fusión, número de fusión, y tipo de hierro fabricado entre otros.

Las muestras para metalografía fueron llevadas inicialmente a una desbastadora para eliminar trazas de rebaba, zonas filosas y planos adicionales sobre la superficie a pulir. Después fueron desbastadas con lijas No. 240, 320, 400 y 600. Posteriormente fueron llevadas al paño fino, en



donde se pulieron con alúmina de los números 0.1 y 0.03 hasta espejo, al terminar el pulido, fueron enjuagadas con agua para retirar la alúmina y con alcohol para desplazar al agua y evitar que se oxidara la superficie, el secado se realizó con aire a presión. Finalmente las muestras fueron llevadas a los microscopios ópticos y al analizador de imágenes para su estudio.

## CAPITULO V

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Debido a que el proceso de fabricación de hierro vermicular en un convertidor de doble cámara es relativamente nuevo, continúa aún bajo estudio; por ello fue necesario estandarizar las condiciones de trabajo y operación para mantener lo más estable y reproducible posible dicha técnica de fusión; entre la variables de procesos presentes destacan las temperaturas de trabajo, de vaciado al convertidor, de tratamiento, el tiempo de reacción del nodulizante con el metal líquido, el ángulo de giro del convertidor, así como el tiempo empleado desde el vaciado del metal líquido al convertidor hasta el colado de las barras.

| Temperatura de trabajo (°C) | Temperatura de vaciado (°C) | Temperatura de tratamiento (°C) | Tiempo de Reacción del Nodulizante (s) | Angulo de Giro del convertidor (°) | Tiempo (s) |
|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------|------------|
| 1450-1500                   | 1570 -1600                  | 1417-1429                       | 60                                     | 135                                | 260-300    |

A su vez, y en lo posible se trató de que el personal involucrado en las fusiones fuera siempre el mismo, con el objetivo de disminuir el factor de error humano o en su defecto, mantenerlo constante.

## 5.1 COMPOSICIÓN QUÍMICA.

A continuación se muestran las composiciones químicas de cada una de las corridas.

Tabla 5.1. Corrida 1

|          | % C    | % Si   | % Mn   | % P    | % S    | % Cu   | % Mg     |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|
| C.Q.P. 1 | 2.2940 | 1.1760 | 0.3081 | 0.0119 | 0.0293 | 0.2469 | < 0.0050 |
| C.Q.P. 2 | 3.7530 | 1.6940 | 0.5060 | 0.0149 | 0.0211 | 0.3496 | < 0.0050 |
| C.Q.V.   | 3.6450 | 1.6880 | 0.5070 | 0.0146 | 0.0214 | 0.3448 | < 0.0050 |
| C.Q.F. 1 | 3.2350 | 2.4060 | 0.5030 | 0.0123 | 0.0180 | 0.3350 | 0.0190   |
| C.Q.F. 2 | 3.0700 | 2.4190 | 0.5000 | 0.0128 | 0.0181 | 0.3311 | 0.0187   |
| C.Q.F. 3 | 3.0540 | 2.4940 | 0.4997 | 0.0120 | 0.0165 | 0.3307 | 0.0238   |

Tabla 5.2. Corrida 2

|          | % C    | % Si   | % Mn   | % P     | % S    | % Cu   | % Mg     |
|----------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|----------|
| C.Q.P. 1 | 3.2570 | 1.1050 | 0.3222 | <0.0100 | 0.0170 | 0.2176 | < 0.0050 |
| C.Q.P. 2 | 3.9270 | 1.7260 | 0.5110 | 0.0126  | 0.0207 | 0.3579 | < 0.0050 |
| C.Q.V.   | 3.7910 | 1.9820 | 0.5110 | 0.0114  | 0.0191 | 0.3539 | < 0.0050 |
| C.Q.F. 1 | 3.5650 | 2.4390 | 0.4991 | <0.0100 | 0.0146 | 0.3463 | 0.0109   |
| C.Q.F. 2 | 3.4420 | 2.4990 | 0.4986 | <0.0101 | 0.0142 | 0.3423 | 0.0103   |
| C.Q.F. 3 | 3.5160 | 2.4370 | 0.4943 | <0.0102 | 0.0138 | 0.3416 | 0.0103   |

Tabla 5.3. Corrida 3

|          | % C    | % Si   | % Mn   | % P    | % S    | % Cu   | % Mg     |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|
| C.Q.P. 1 | 3.5270 | 1.2500 | 0.2701 | 0.0122 | 0.0181 | 0.2240 | < 0.0050 |
| C.Q.P. 2 | 3.6790 | 1.9860 | 0.5040 | 0.0143 | 0.0183 | 0.3541 | < 0.0050 |
| C.Q.V.   | 3.7940 | 2.0040 | 0.5040 | 0.0154 | 0.0216 | 0.3620 | < 0.0050 |
| C.Q.F. 1 | 3.2950 | 2.4900 | 0.4929 | 0.0120 | 0.0171 | 0.3427 | 0.0122   |
| C.Q.F. 2 | 3.1170 | 2.6590 | 0.5010 | 0.0121 | 0.0153 | 0.3441 | 0.0115   |
| C.Q.F. 3 | 3.3320 | 2.4930 | 0.4892 | 0.0126 | 0.0171 | 0.3466 | 0.0118   |

Tabla 5.4. Corrida 4

|          | % C    | % Si   | % Mn   | % P    | % S    | % Cu   | % Mg     |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|
| C.Q.P. 1 | 3.4780 | 1.2390 | 0.3013 | 0.0129 | 0.0177 | 0.2205 | < 0.0050 |
| C.Q.P. 2 | 3.8200 | 1.9800 | 0.5040 | 0.0173 | 0.0217 | 0.3706 | < 0.0050 |
| C.Q.V.   | 3.7800 | 1.9980 | 0.4996 | 0.0161 | 0.0206 | 0.3662 | < 0.0050 |
| C.Q.F. 1 | 3.4630 | 2.4660 | 0.4956 | 0.0136 | 0.0154 | 0.3555 | 0.0136   |
| C.Q.F. 2 | 3.3760 | 2.5840 | 0.4987 | 0.0136 | 0.0148 | 0.3528 | 0.0138   |
| C.Q.F. 3 | 3.3800 | 2.4640 | 0.4903 | 0.0134 | 0.0143 | 0.3530 | 0.0131   |

Tabla 5.5. Corrida 5

|          | % C    | % Si   | % Mn   | % P    | % S    | % Cu   | % Mg     |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|
| C.Q.P. 1 | 3.3930 | 1.3290 | 0.3074 | 0.0143 | 0.0189 | 0.2255 | < 0.0050 |
| C.Q.P. 2 | 3.7190 | 1.8860 | 0.5010 | 0.0167 | 0.0206 | 0.3501 | < 0.0050 |
| C.Q.V.   | 3.8100 | 1.8800 | 0.5050 | 0.0180 | 0.0217 | 0.3530 | < 0.0050 |
| C.Q.F. 1 | 3.5440 | 2.5120 | 0.5060 | 0.0167 | 0.0169 | 0.3451 | 0.0105   |
| C.Q.F. 2 | 3.5830 | 2.2980 | 0.4947 | 0.0156 | 0.0158 | 0.3460 | 0.0112   |
| C.Q.F. 3 | 3.5990 | 2.3070 | 0.4930 | 0.0156 | 0.0145 | 0.3465 | 0.0106   |

- ✓ **C.Q.P. 1.** Composición química inicial con la cual se realizó el balance de carga
- ✓ **C.Q.P. 2.** Composición química ajustada
- ✓ **C.Q.V.** Composición química previa al tratamiento de nodulización.
- ✓ **C.Q.F. 1, 2 y 3.** Composiciones químicas finales.

En la tabla 5.6 se presentan las composiciones químicas finales promedio para la obtención de una fundición vermicular con diferentes niveles de magnesio, los cuales fueron evaluados por medio del espectrómetro de emisión.

Tabla 5.6. Composiciones Químicas Finales Promedio (C.Q.F.)

| Corrida | % Mg <sub>Residual</sub><br>teórico (Nivel) | % C    | % Si   | % Mn   | % P     | % S    | % Cu   | % Mg   |
|---------|---------------------------------------------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|
| 1       | 0.035                                       | 3.1197 | 2.4397 | 0.5009 | 0.0124  | 0.0175 | 0.3323 | 0.0205 |
| 2       | 0.035                                       | 3.5077 | 2.4583 | 0.4973 | <0.0100 | 0.0142 | 0.3434 | 0.0105 |
| 3       | 0.022                                       | 3.2480 | 2.5473 | 0.4944 | 0.0122  | 0.0165 | 0.3445 | 0.0118 |
| 4       | 0.022                                       | 3.4063 | 2.5047 | 0.4949 | 0.0135  | 0.0148 | 0.3538 | 0.0135 |
| 5       | 0.018                                       | 3.5753 | 2.3723 | 0.4979 | 0.0160  | 0.0157 | 0.3459 | 0.0108 |

## 5.2 EFICIENCIA EFECTIVA DEL MAGNESIO (CONSIDERANDO EL PORCENTAJE DE ADICIÓN).

Se consideró como eficiencia efectiva del magnesio a la relación que existe entre la cantidad de magnesio agregado (utilizado ó neto) con respecto a la cantidad de Mg<sub>Residual</sub> (Composición Química Final (C.Q.F.) de Mg). El cálculo para determinar dicha eficiencia se describe a continuación.

Para la corrida 1 se consideró un Nivel de 0.035% de Mg, a su vez la Composición Química Final de Mg (Mg<sub>Residual</sub>) tiene un valor de 0.0205% la cantidad de nodulizante empleada fue de 364.154g de FeSiMg con una composición química de magnesio de 5.5%; la cantidad de Mg total (Mg<sub>Nivel</sub> + Mg<sub>Reacción</sub>) adicionado se determina de la siguiente manera:

$$g \text{ Mg}_{Add \text{ Total}} = \frac{(C.Q.Nodulizante)(g \text{ FeSiMg}_{Add})}{100\%}$$

$$g \text{ Mg}_{Add \text{ Total}} = \frac{(5.5\%)(364.154 g \text{ FeSiMg})}{100\%} = 20.0285 g \text{ Mg}_{Add \text{ Total}}$$

Como se puede apreciar, el valor de Mg adicionado del cálculo anterior corresponde al valor de Mg estimado en el balance de carga del capítulo IV (Pág. 67).

El cálculo de los gramos de magnesio requeridos para obtener  $Mg_{Residual}$  de 0.035% es el siguiente:

$$(Kg \text{ Carga}) \left( \frac{Nivel \text{ Mg}}{100\%} \right) \left( \frac{1000g}{1Kg} \right) = g \text{ Mg}_{Nivel}$$

$$(35Kg) \left( \frac{0.035\% Mg}{100\%} \right) \left( \frac{1000g}{1Kg} \right) = 12.25g \text{ Mg}_{Nivel}$$

Es importante recordar que una cantidad de Mg reaccionó con el azufre presente en el metal líquido, por lo que se consideró una cantidad adicional de Mg (además del *Nivel*), el valor de esta cantidad corresponde estequiométricamente a la cantidad de azufre presente en el metal líquido y en la Composición Química Preliminar (C.Q.P) 1 ó 2. Dicho valor de Mg fue estimado en el balance de carga descrito en el Capítulo IV.

Para determinar el porcentaje de Mg adicionado se considera la siguiente expresión:

$$\% Mg_{Add\ Total} = g\ Mg_{Add\ Total} \frac{\% Nivel\ Mg}{g\ Nivel\ Mg}$$

$$\% Mg_{Add\ Total} = 20.0285\ g\ Mg \times \frac{0.035\% Mg}{12.25\ g Mg} = 0.05722\% Mg_{Add\ Total}$$

Finalmente se relaciona al Mg residual (C.Q.F. de Mg) con la cantidad total de Mg adicionada para obtener la eficiencia efectiva del Mg.

$$\eta_{Efectiva\ Mg} = \frac{\% Mg_{Residual}}{\% Mg_{Add\ Total}} * 100\%$$

$$\eta_{Efectiva\ Mg} = \frac{0.0205\% Mg}{0.05722\% Mg} \times 100\% = 35.824\%$$

La tabla 5.7 presenta el porcentaje de magnesio teórico deseado (el Nivel) para cada corrida, así como los valores de Mg residual (C.Q.F. de Mg), la cantidad de nodulizante empleado, los gramos de Mg total adicionado, los gramos de Mg correspondientes a cada nivel, el porcentaje de Mg total adicionado y la eficiencia efectiva del Mg.

Tabla 5.7 Resultados de las eficiencias efectivas del magnesio en el convertidor.

| % Mg <sub>Residual</sub><br>Teórico (Nivel) | % Mg<br>Residual | FeSiMg <sub>Add</sub><br>(g) | Mg <sub>Add Total</sub><br>(g) | Mg <sub>Add Nivel</sub><br>(g) | % Mg <sub>Add</sub><br>Total | Eficiencia<br>efectiva del Mg |
|---------------------------------------------|------------------|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| 0.035                                       | 0.0205           | 364.154                      | 20.0285                        | 12.25                          | 0.0572                       | 35.824%                       |
| 0.035                                       | 0.0105           | *207.303                     | 17.7451                        | 12.25                          | 0.0507                       | 20.710%                       |
| 0.022                                       | 0.0118           | 227.388                      | 12.5063                        | 7.7                            | 0.0357                       | 33.117%                       |
| 0.022                                       | 0.0135           | 244.766                      | 13.4621                        | 7.7                            | 0.0385                       | 35.098%                       |
| 0.018                                       | 0.0108           | 213.988                      | 11.7693                        | 6.3                            | 0.0336                       | 32.018%                       |

\* La composición química de Mg del nodulizante es 8.54%

### 5.3 TEMPERATURAS DE COLADA .

La temperatura de colada para cada serie de barras quedó estructurada de acuerdo a la tabla 5.5.

Tabla 5.5 Distribución de las barras fabricadas & sus respectivas temperaturas de colada.

| Corrida | No. de Barras | Alta Temperatura |         | Baja Temperatura |         |
|---------|---------------|------------------|---------|------------------|---------|
|         |               | 1 plg            | ½ plg   | 1 plg            | ½ plg   |
| 1       | 2             | 1291 °C          | 1291 °C |                  |         |
| 2       | 2             | 1289 °C          | 1289 °C |                  |         |
| 3       | 2             | 1307 °C          | 1307 °C |                  |         |
| 4       | 4             | 1311 °C          | 1311 °C | 1229 °C          | 1229 °C |
| 5       | 4             | 1310 °C          | 1310 °C | 1187 °C          | 1187 °C |

### 5.4 MICROESTRUCTURAS DE LOS HIERROS FABRICADOS.

#### 5.4.1 EVALUACIÓN DE LA PROPORCIÓN DE GRAFITO VERMICULAR.

La evaluación de la proporción de grafito vermicular de cada corrida se fundó en los patrones de T. Kimura, el cual toma como referencia la cantidad de grafito en forma de vermículos y esferoides en la estructura en una transición vermicular-nodular, presentados en el apéndice C.

A continuación se presentan las microestructuras obtenidas después del tratamiento de nodulización, mediante el empleo del analizador de imágenes a 100X sin ataque. Todas las corridas presentan una transición grafito vermicular-nodular.



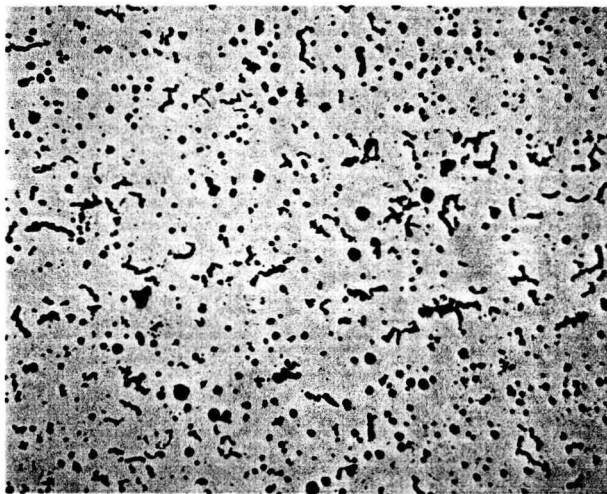


Figura 5.2. Corrida #1, 0.035% Nivel, 0.0205% Mg residual, ½ plg. 100X  
(5.5% Mg Nodulizante) Alta Temperatura, sin ataque  
65% grafito vermicular y 35% nodular.

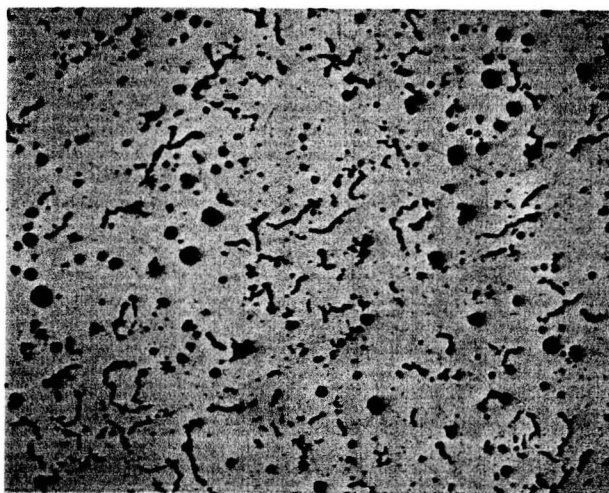


Figura 5.3. Corrida #1, 0.035% Nivel, 0.0205% Mg residual, 1 plg. 100X  
(5.5% Mg Nodulizante) Alta Temperatura, sin ataque  
65% grafito vermicular y 35% nodular.

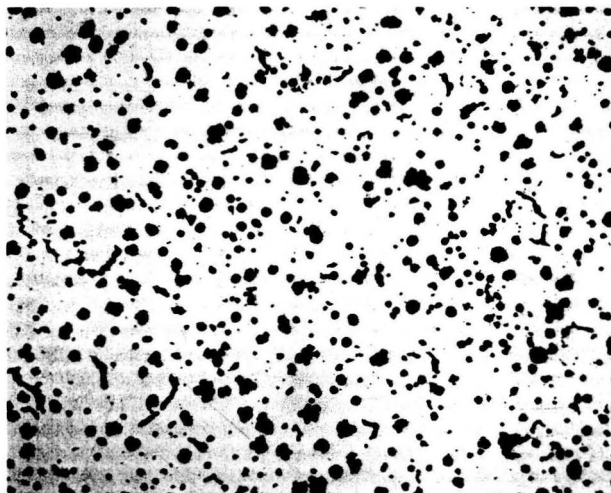


Figura 5.4. Corrida #2, 0.035% Nivel, 0.0105% Mg residual, ½ plg. 100X  
(8.56 %Mg Nodulizante) Alta Temperatura, sin ataque  
10% grafito vermicular y 90% nodular.

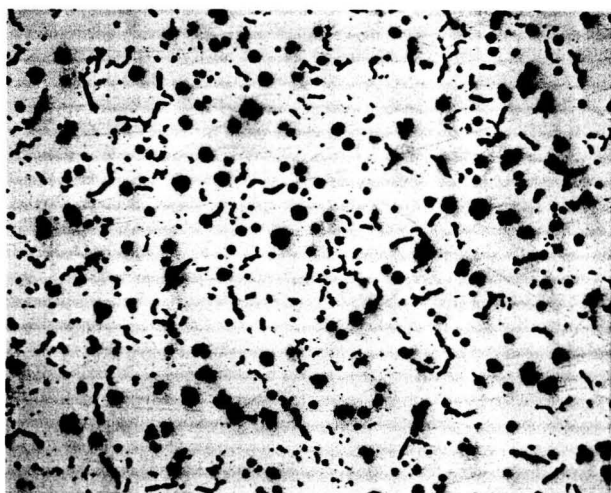


Figura 5.5. Corrida #2, 0.035% Nivel, 0.0105% Mg residual, 1 plg. 100X  
(8.56 %Mg Nodulizante) Alta Temperatura, sin ataque  
85% grafito vermicular y 15% nodular.

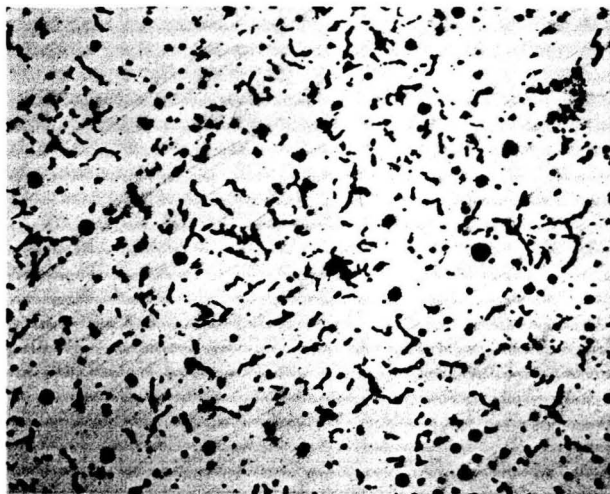


Figura 5.6. Corrida #3, 0.022% Nivel, 0.0118% Mg residual, ½ plg. 100X  
(5.5% Mg Nodulizante) Alta Temperatura, sin ataque  
91% grafito vermicular y 9% nodular.

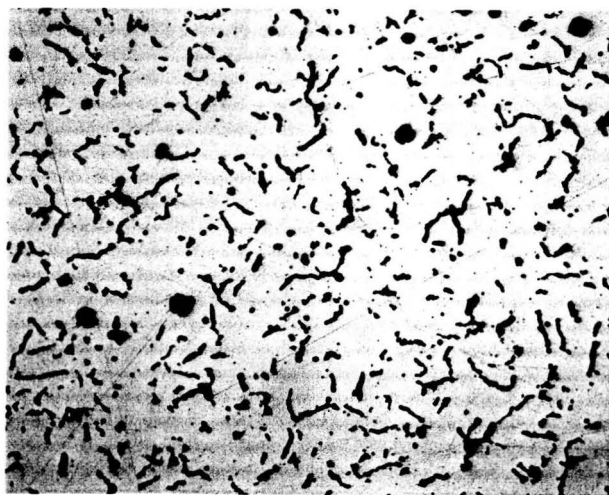


Figura 5.7. Corrida #3, 0.022% Nivel, 0.0118% Mg residual, 1 plg. 100X  
(5.5% Mg Nodulizante) Alta Temperatura, sin ataque  
96% grafito vermicular y 4% nodular.



Figura 5.8. Corrida #4, 0.022% Nivel, 0.0135% Mg residual, ½ plg. 100X  
(5.5% Mg Nodulizante) Alta Temperatura, sin ataque  
96% grafito vermicular y 4% nodular.

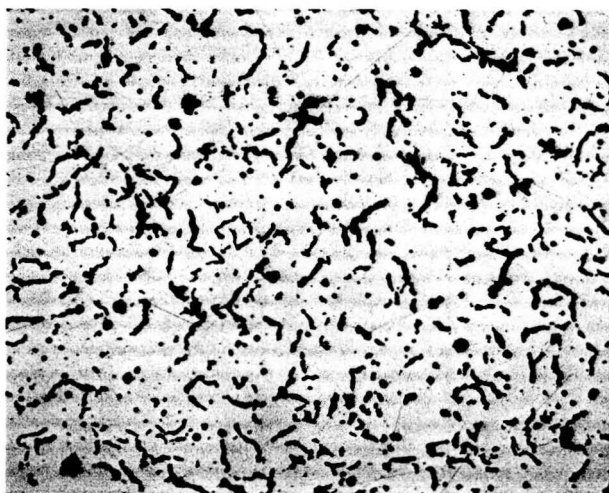


Figura 5.9. Corrida #4, 0.022% Nivel, 0.0135% Mg residual, 1 plg. 100X  
(5.5% Mg Nodulizante) Alta Temperatura, sin ataque  
96% grafito vermicular y 4% nodular.

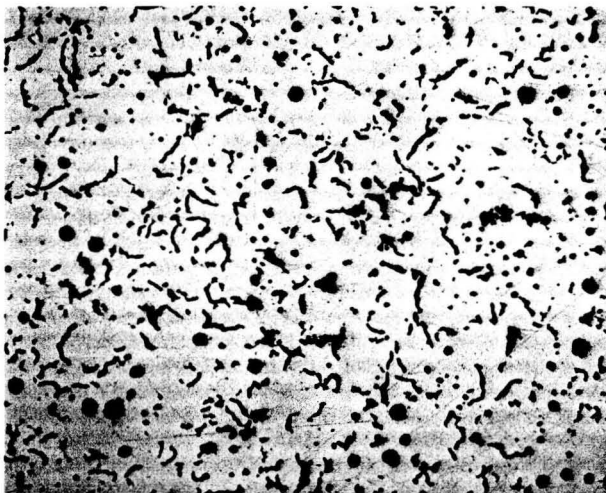


Figura 5.10. Corrida #4, 0.022% Nivel, 0.0135% Mg residual, ½ plg. 100X  
(5.5% Mg Nodulizante) Baja Temperatura, sin ataque  
91% grafito vermicular y 9% nodular.

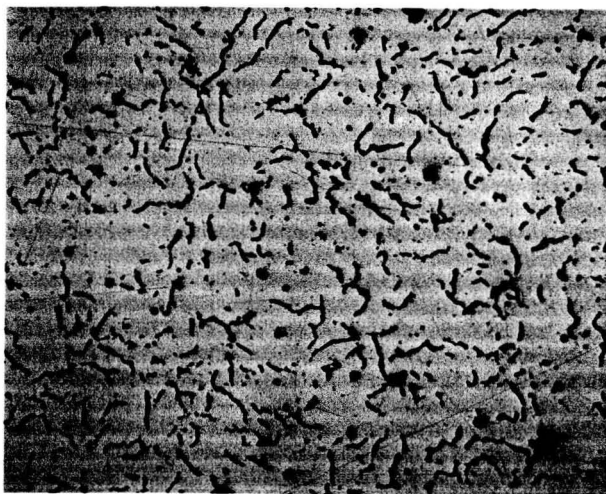


Figura 5.11. Corrida #4, 0.022% Nivel, 0.0135% Mg residual, 1 plg. 100X  
(5.5% Mg Nodulizante) Baja Temperatura, sin ataque  
96% grafito vermicular y 4% nodular.



Figura 5.12. Corrida #5, 0.018% Nivel, 0.0108% Mg residual, ½ plg. 100X  
(5.5% Mg Nodulizante) Alta Temperatura, sin ataque  
100% Grafito en forma de Hojuela.



Figura 5.13. Corrida #5, 0.018% Nivel, 0.0108% Mg residual, 1 plg. 100X  
(5.5% Mg Nodulizante) Alta Temperatura, sin ataque  
100% Grafito en forma de Hojuela.



Figura 5.14. Corrida #5, 0.018% Nivel, 0.0108% Mg residual, ½ plg. 100X  
(5.5% Mg Nodulizante) Baja Temperatura, sin ataque  
100% Grafito en forma de Hojuela.



Figura 5.15. Corrida #5, 0.018% Nivel, 0.0108% Mg residual, 1 plg. 100X  
(5.5% Mg Nodulizante) Baja Temperatura, sin ataque  
100% Grafito en forma de Hojuela.



#### **5.4.2 EVALUACIÓN DE LA MATRIZ.**

La evaluación de la matriz se realizó atacando las muestras con nital 2, y comparando la matriz con los patrones; dicha evaluación fue observada en el analizado de imágenes a 100X.

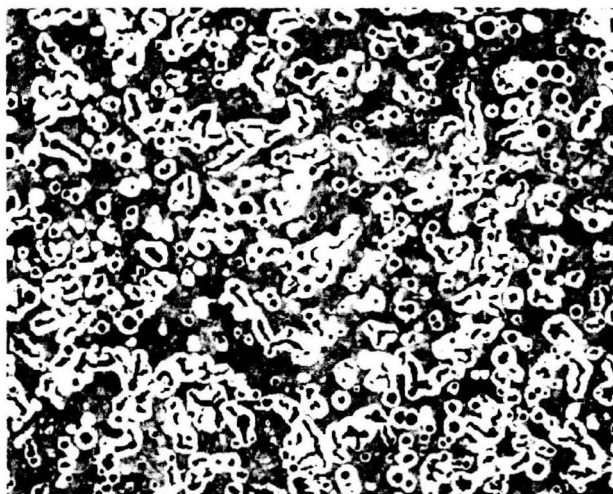


Figura 5.16. Corrida #1, 0.035% Mg residual, ½ plg. 100X  
(5.5% Mg Nodulizante) Alta Temperatura, con ataque  
Matriz perlita ferrita

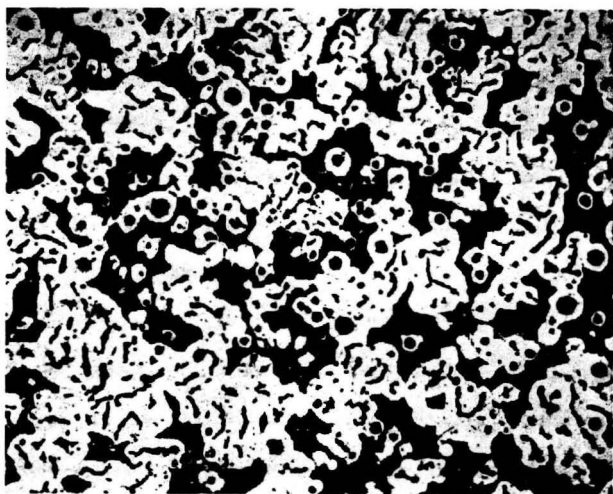


Figura 5.17. Corrida #1, 0.035% Mg residual, 1 plg. 100X  
(5.5% Mg Nodulizante) Alta Temperatura, con ataque  
Matriz perlita ferrita

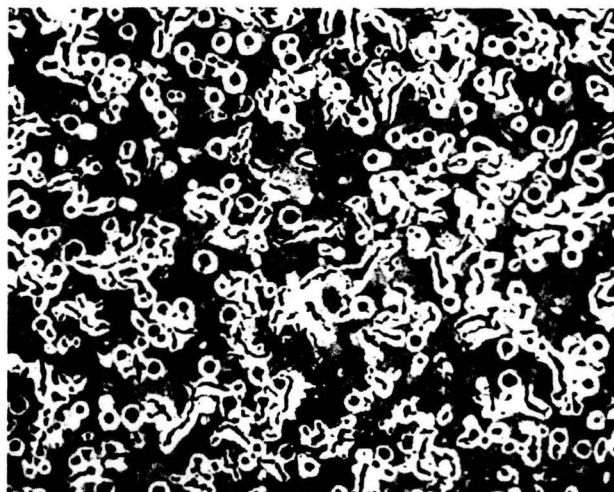


Figura 5.18. Corrida #2, 0.035% Mg residual, 1 plg. 100X  
(8.56% Mg Nodulizante) Alta Temperatura, con ataque  
Matriz perlita ferrita

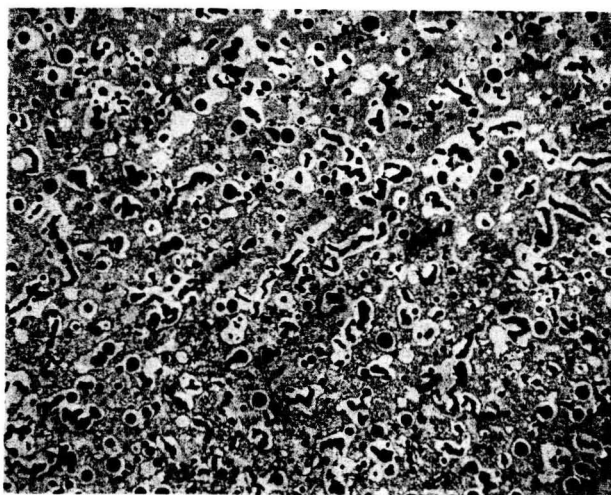


Figura 5.19. Corrida #2, 0.035% Mg residual, 1 plg. 100X  
(8.56% Mg Nodulizante) Alta Temperatura, con ataque  
Matriz perlita ferrita

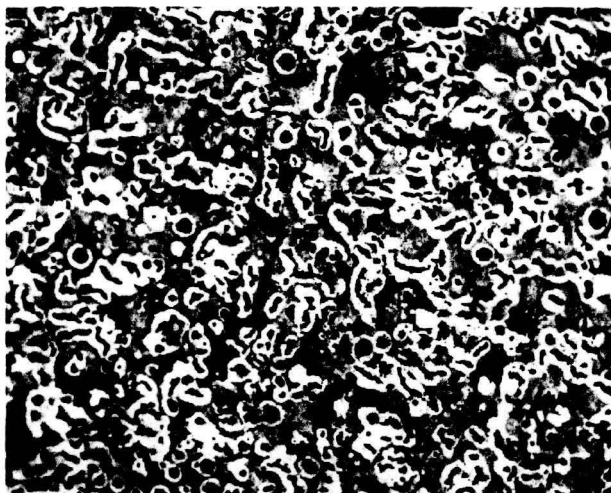


Figura 5.20. Corrida #3, 0.022% Mg residual,  $\frac{1}{2}$  plg. 100X  
(5.5% Mg Nodulizante) Alta Temperatura, con ataque  
Matriz perlita ferrita

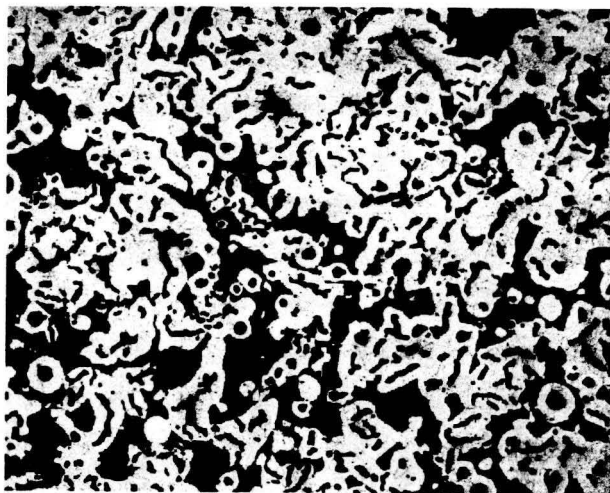


Figura 5.21 Corrida #3, 0.022% Mg residual, 1 plg. 100X  
(5.5% Mg Nodulizante) Alta Temperatura, con ataque  
Matriz perlita ferrita

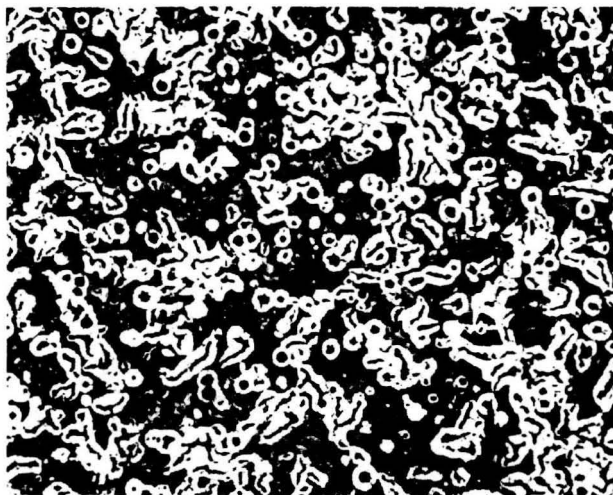


Figura 5.22 Corrida #4, 0.022% Mg residual,  $\frac{1}{2}$  plg. 100X  
(5.5% Mg Nodulizante) Alta Temperatura, con ataque  
Matriz perlita ferrita

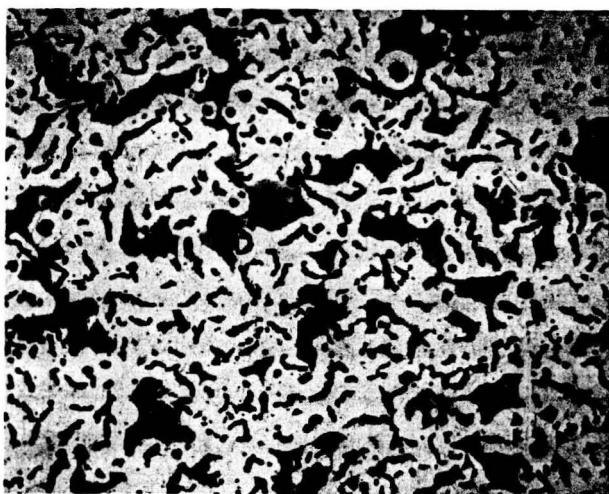


Figura 5.23 Corrida #4, 0.022% Mg residual, 1 plg. 100X  
(5.5% Mg Nodulizante) Alta Temperatura, con ataque  
Matriz perlita ferrita

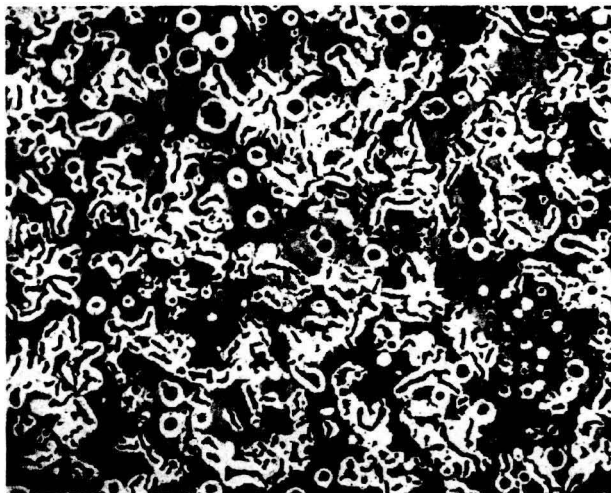


Figura 5.24. Corrida #4, 0.022% Mg residual, ½ plg. 100X  
(5.5% Mg Nodulizante) Baja Temperatura, con ataque  
Matriz perlita ferrita

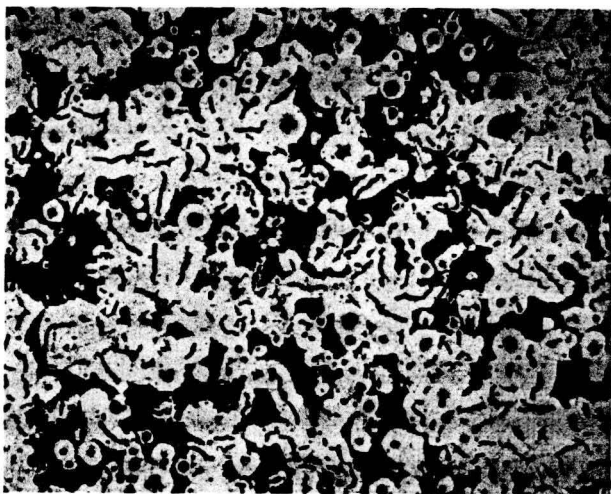


Figura 5.25. Corrida #4, 0.022% Mg residual, 1 plg. 100X  
(5.5% Mg Nodulizante) Baja Temperatura, con ataque  
Matriz perlita ferrita

## **5.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Uno de los grandes frutos debido al número de corridas de prueba, fue sin duda, el perfeccionamiento de la técnica de fusión, logrando ajustar los tiempos de carga del horno, análisis químico, tratamiento de nodulización, colada, etc. Así mismo, las principales variables de proceso como son la composición química requerida, temperaturas de trabajo, ángulo de giro, temperatura de colada, tiempo de tratamiento entre otras se realizaron bajo las más estrictas condiciones establecidas, con el objetivo de realizar el proceso de la fundición lo más estable y reproducible posible.

El hecho de que se mantuviera una temperatura de vaciado en un intervalo de 50 a 100°C más que en la industria, obedece a la capacidad del convertidor de doble cámara que es de 35 Kg de hierro, mientras que en la industria, los volúmenes de producción superan los 500 Kg por colada, en otras palabras, tiene mayor impacto el enfriamiento en volúmenes menores de producción. Por esta razón y para evitar la solidificación prematura del metal, fue necesario este incremento de temperatura.

El ángulo de giro que experimenta el convertidor para ingresar el metal líquido a la cámara de reacción logrando atrapar al nodulizante, se determinó mediante la utilización del modelo a escala; así mismo, fue instalado un tope de giro el cual garantizó generar el mismo ángulo para todos los experimentos realizados. Sin embargo, la velocidad de giro fue realizada de manera manual; para evitar variaciones de consideración en la velocidad de giro, fue necesario que la misma persona realizara todos los giros.

Al evaluar la cantidad de nodulizante una de las medidas tomadas en cuenta fue considerar el azufre presente en el metal líquido, lo cual fue un



acierto, sin embargo, existe una cierta cantidad de oxígeno disuelto en el baño líquido que no fue considerada, esto definitivamente repercute en la eficiencia del Mg ya que una parte de este oxígeno disuelto reacciona con él.

El criterio empleado para la evaluación del magnesio residual en los hierros con grafito compacto (CGI) fabricados en el presente trabajo, fue considerando al Mg de la composición química final, lo anterior se fundamenta básicamente en dos razones.

1. La obtención de microestructuras con grafito en forma vermicular de manera uniforme en piezas de fundición. Por lo que se evalúa el tipo de grafito y cantidad (%).
2. Los modelos usuales para el cálculo del magnesio residual no se ajustan para este tipo de convertidor de doble cámara.

Es importante señalar que el "Nivel" de Mg señalado, hace referencia únicamente al % de Mg teórico requerido en la composición química deseada, de modo que el Mg residual es el que ha resultado de los análisis químicos de la composición química final.

#### **ANÁLISIS DEL GRAFITO EN LA MICROESTRUCTURA.**

En la tabla 5.6 se muestran las cantidades en porcentajes de grafito en forma de hojuela, vermiculos y/o nódulos tomando como referencia los patrones propuestos por T. Kimura y C.R. Loper Jr. (ver apéndice C), en el que se presentan diferentes formas de grafito precipitado en una fundición colada.

Podemos destacar las corridas 3 y 4 las cuales fueron realizadas para un Nivel de 0.022% de Mg, donde alcanzaron los porcentajes más elevados de grafito compacto para ambos diámetros de barras empleadas. Además, presentaron una distribución de vermículos uniforme en toda su superficie.

Por otra parte, la corrida uno presentó la misma tendencia de proporción de grafito compacto en las barras de ambos diámetros, pero en menor cantidad que las corridas tres y cuatro, debido a que el Nivel de Mg fue de 0.035%. Este incremento en el Nivel promovió la tendencia a la nodulización, reflejándose en la cantidad de nódulos en la microestructura.

Tabla 5.6. Porcentaje de hojuelas, vermículos y esferoides

| Corrida | Nivel de Mg | Mg Residual | Barras de ½ plg |            |            | Barras de 1 plg |            |            |
|---------|-------------|-------------|-----------------|------------|------------|-----------------|------------|------------|
|         |             |             | Hojuelas        | Vermículos | Esferoides | Hojuelas        | Vermículos | Esferoides |
| 1       | 0.035       | 0.0205      | 0%              | 65%        | 35%        | 0%              | 65%        | 35%        |
| 2       | 0.035       | 0.0105      | 0%              | 10%        | 90%        | 0%              | 85%        | 15%        |
| 3       | 0.022       | 0.0118      | 0%              | 91%        | 9%         | 0%              | 96%        | 4%         |
| 4       | 0.022       | 0.0135      | 0%              | 96%        | 4%         | 0%              | 96%        | 4%         |
| 5       | 0.018       | 0.0108      | 100%            | 0%         | 0%         | 100%            | 0%         | 0%         |

En la tabla 5.7 se indica el tipo de matriz obtenida en las fundiciones vermiculares.

Tabla 5.7 Matriz de los hierros vermiculares.

| Corrida | Nivel de Mg | Mg Residual | Tipo de Matriz  |                 |
|---------|-------------|-------------|-----------------|-----------------|
|         |             |             | Barras de ½ plg | Barras de 1 plg |
| 1       | 0.035       | 0.0205      | perlita-ferrita | ferrita-perlita |
| 2       | 0.035       | 0.0105      | perlita-ferrita | ferrita-perlita |
| 3       | 0.022       | 0.0118      | perlita-ferrita | ferrita-perlita |
| 4       | 0.022       | 0.0135      | perlita-ferrita | ferrita-perlita |

Cabe resaltar la corrida número dos, en la barra de sección crítica presentó un elevado número de nódulos en el orden de 90% mientras que la barra de una pulgada presentó una elevada cantidad de vermículos (85%). Esto se explica de la siguiente manera:

1. El tipo de nodulizante utilizado fue diferente al de las demás corridas (Nodulizante con 8.56 % de Mg).
2. En todos los experimentos de prueba con la utilización de este nodulizante (con 8.56 % de Mg) resultaron en una mala calidad (microestructural) de hierro vermicular/nodular y con eficiencias de Mg muy bajas, por lo que el nodulizante óptimo para el tratamiento de nodulización en este proceso es el que presenta una composición química de 5.5% de Mg.
3. Es posible que la composición química de Mg en el nodulizante especificada en el producto sea equivocada.

Finalmente la corrida 5 se realizó con un nivel de 0.018% de Mg, lo que resultó en una insuficiente cantidad de Mg en el tratamiento de nodulización obteniendo como resultado hojuelas de grafito. El tipo de grafito precipitado fue "A", "B" y "C", esto tiene que ver directamente con la composición química, determinando la cantidad de carbono equivalente:

$$C_{Equiv} = \%C + \frac{\%Si + \%P}{3} = 3.5753 + \frac{2.3723 + 0.0160}{3} = 4.371\%$$

Este carbón equivalente nos coloca por encima del eutéctico, es decir, la corrida 5 es una fundición gris hipereutéctica, por lo que el grafito tipo "C" es característica de este tipo de fundición.

#### **ANÁLISIS DEL TIPO DE MATRIZ.**

La matriz presente en las barras de ½ pulgada fue perlita-ferrita (Tabla 5.7) mientras que en las de una pulgada fue ferrita-perlita. El manganeso es el responsable de definir la matriz y debido a los niveles

manejados en la composición química final podemos establecer que la velocidad de enfriamiento fue la responsable en la definición de la matriz para este nivel de Mn en particular.

#### **ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA EFECTIVA.**

Las eficiencias obtenidas para el Mg oscilan entre un 32.018% y 35.824%, en promedio 34.014% (utilizando el nodulizante de 5.5% Mg). El hecho de que el margen de las eficiencias a diferentes niveles sea pequeño ó cerrado, nos indica gran estabilidad en el proceso de fabricación, en otras palabras, los resultados son reproducibles. Sin embargo, las eficiencias resultantes continúan siendo relativamente bajas, aunque con resultados en la microestructura de excelente calidad.

Los bajos valores en las eficiencias del Mg, radican en el bajo punto de fusión del Mg, así como, en las reacciones secundarias que se llevan a cabo como la del Mg con el O disuelto que no fue considerada.

## **CAPITULO VI.**

### **6. CONCLUSIONES.**

En base a los resultados obtenidos del presente trabajo y al respectivo análisis de los mismos, las conclusiones son las siguientes:

1. Mediante el convertidor de doble cámara y el empleo del FeSi5%Mg se logró obtener hierro vermicular de alta calidad en la microestructura, con un porcentaje efectivo de Mg de 34.014% en promedio.
2. El nodulizante óptimo para la fabricación de hierro vermicular en el convertidor de doble cámara es el FeSi5%Mg.
3. El nivel de Mg óptimo para la fabricación de hierro vermicular (CGI) en el convertidor de doble cámara es de 0.022%.
4. La cantidad de nodulizante (Mg total), está en función del Nivel de Mg requerido más la cantidad de Mg reaccionante con la cantidad presente de azufre.
5. La inoculación (0.15%) y Post-Inoculación (0.15%) son factores clave en el impedimento de la formación de carburos de hierro (cementita).
6. El diseño y utilización de software (*Project GGV25*) para el balance de carga, optimizó el tiempo de respuesta, así como, se logró obtener una composición química precisa.

## **BIBLIOGRAFÍA**

1. Sintercast, *Historia del hierro de grafito compacto.*, [www.sintercast.se/egihist.htm](http://www.sintercast.se/egihist.htm)., 1997
2. Heine, Richard W. Loper jr & Carl R. Rosenthal, Philip C., *Principles of Metal Casting*, 2ª edición, USA, 1967, pp 49-1 648
3. Shao. S & Dawson, S., *The mechanical and Physical Properties of Compacted Graphite Iron*, [www.sintercast.se/success.htm](http://www.sintercast.se/success.htm)., 1997
4. American Society for Metal, *Compacted Graphite Iron*, Metals Handbook. Vol. 15, Casting USA, 9ª ed., 1992, pp 668-676.
5. American Society for Metals, *Compacted Graphite Iron*, Metals Handbook. Vol. 1, Properties and selection: Iron, Steels and High Performance alloys, USA, 9ª ed., 1992 pp 56-70, 85-94
6. American Society for Metals, *Cast Iron*, Metals Handbook Desk Edition, USA, 1ª ed., 1984.
7. American Foundrymen's Society Inc., *Ductil Iron Handbook*, USA, 1ª ed., 1992, pp 1-8, 140-142, 148-153, 155-165, 167-168.
8. Stephen Istvan Karsay, *Ductil Iron Production Practices*, American Foundrymen's Society, USA, 1ª ed. 1975 pp 24-30, 54-76.
9. Stoughton Bradley, *The Metallurgy of Iron and Steel*, Mac Graw-Hill, USA, 3a Ed. 1975, pp 350-369.

10. Ekey D.C. & Winter W. P., *Introduction to Foundry Technology*, Mac Graw-Hill, USA, 1ª Ed., 1958, pp 124-130.
11. Elliot Bsc. Roy, *Cast Iron Technology*, Butterworths, USA, 1a Ed., 1988, pp 11-109.
12. Kimura T. & Lopper Jr. C. R., *Rare Earth Silicide Additions to Cast Iron*, AFS Transactions, (1980), pp 67-76.
13. Alstetter J. D., Nowicki R. M., *Compacted Graphite Iron: Its Properties and Automotive Applications*, AFS Transactions, (1982), pp 959-970.
14. Monroe R. W. Bates C.E., *Some thermal an Mechanical Properties of Compacted Graphite Iron*, AFS Transactions (1982), pp 615-619.
15. Liu J., Ding N. X. & Mercer J. L., *Effect of Type Amount of Treatment Alloy on Compacted Graphite Produced by the Flotret Procces*, AFS Transactions, (1985), pp 675-684.
16. Cuevas Ayala Carlos, *Métodos de Producción de Hierro Compacto y Nodular*, Tesis de Licenciatura, Facultad de Química, UNAM, 1997.
17. Ruiz Tamayo Agustín Gerardo, *Producción de hierro nodular con Fe-Si-5%Mg a partir del diseño de un convertidor de doble cámara*, Tesis de Licenciatura, Facultad de Química, UNAM, 2003.

18. Escobar Mejía Luis Darío, *Relación azufre-Magnesio en hierros vermiculares*. Tesis de Licenciatura, Facultad de Química, UNAM, 2003.
19. Dawson Steve, *Controlling the production of compacted graphite iron*, SinterCast, Inc, Auburn Hills, Michigan USA, 1998.



## APÉNDICE A

### CODIGO DE PROGRAMACIÓN.

A continuación se presentan los códigos de programación de "Módulos de Enfriamiento" & "Project GGV25"

#### MODULOS DE ENFRIAMIENTO.

```

Option Explicit
Dim h As Double
Dim D As Double
Dim A As Double
Dim V As Double
Dim Modulo As Double
Dim T0 As Double
Dim Tm As Double
Dim Hf As Double
Dim Hm As Double
Dim DensM As Double
Dim DensR As Double
Dim k As Double
Dim Cp As Double
Dim DT As Double
Dim tsi As Double

Private Sub cmdExit_Click()
    End
End Sub
Private Sub cmdMasD_Click()
    '----- Definiendo Variables
    V = txtVol
    Tm = txtTm.Text
    T0 = txtT0.Text
    DensM = txtDM.Text
    DensR = txtDR.Text
    Hf = txtHf.Text
    Cp = txtCp.Text
    k = txtK.Text
    DT = Tm - T0
    Hm = Hf + Cp * DT
    '-----
    txtValD.Text = txtValD.Text + 1
    D = txtValD.Text
    If txtValD.Text > 60 Then
        cmdMasD.Enabled = False
    End If
    If cmdMenosD.Enabled = False Then

```

```

    cmdMenosD.Enabled = True
End If
h = V / (3.1416 * (D ^ 2 / 4))
txtValH = h
A = 2 * 3.1416 * (D / 2) * (h + (D / 2))
txtArea.Text = Round(A, 2)
txtModulo.Text = Round(V / A, 3)
txtD = Round(D, 2)
txth = Round(h, 2)
tsi = ((Sqr(3.1416) / (2 * ((Tm - T0) / (DensM * Hm))) * Sqr(DensR * k * Cp))) ^ 2) *
Modulo ^ 2
End Sub

```

```

Private Sub cmdMasH_Click()
    V = txtVol
    txtValH.Text = txtValH.Text + 1
    h = txtValH.Text
    If txtValH.Text > 60 Then
        cmdMasH.Enabled = False
    End If
    If cmdMenosH.Enabled = False Then
        cmdMenosH.Enabled = True
    End If
    D = 2 * Sqr(V / (3.1416 * h))
    txtValD = D
    A = 2 * 3.1416 * (D / 2) * (h + (D / 2))
    txtArea.Text = Round(A, 2)
    txtModulo.Text = Round(V / A, 3)
    txtD = Round(D, 2)
    txth = Round(h, 2)
End Sub

```

```

Private Sub cmdMenosD_Click()
    V = txtVol
    txtValD.Text = txtValD.Text - 1
    D = txtValD.Text
    If txtValD.Text < 2 Then
        cmdMenosD.Enabled = False
    End If
    If cmdMasD.Enabled = False Then
        cmdMasD.Enabled = True
    End If
    h = V / (3.1416 * (D ^ 2 / 4))
    txtValH = h
    A = 2 * 3.1416 * (D / 2) * (h + (D / 2))
    txtArea.Text = Round(A, 2)
    txtModulo.Text = Round(V / A, 3)
    txtD = Round(D, 2)
    txth = Round(h, 2)
End Sub

```

```

Private Sub cmdMenosH_Click()
    V = txtVol
    txtValH.Text = txtValH.Text - 1
    h = txtValH.Text
    If txtValH.Text < 2 Then
        cmdMenosH.Enabled = False
    End If

```

```

End If
If cmdMasH.Enabled = False Then
    cmdMasH.Enabled = True
End If
D = 2 * Sqr(V / (3.1416 * h))
txtValD = D
A = 2 * 3.1416 * (D / 2) * (h + (D / 2))
txtArea.Text = Round(A, 2)
txtModulo.Text = Round(V / A, 3)
txtD = Round(D, 2)
txth = Round(h, 2)
End Sub

Private Sub cmdRed_Click()
    txtValD.Text = Round(txtValD.Text, 0)
    txtValH.Text = Round(txtValH.Text, 0)
End Sub

Private Sub hsbMasa_Change()
    txtMasa.Text = hsbMasa.Value
    V = hsbMasa.Value / 0.007874
    txtVol.Text = Round(V, 2)
End Sub

```

## PROJECT GGV25.

Option Explicit

```
Dim M As String
Dim O As Double
Dim i As Integer
Dim CQR(0 To 4) As Double
Dim BaseCalc As Double
Dim Ef1(0 To 4) As Double
Dim EfMg As Double
Dim CH1 As Double
Dim CH2 As Double
Dim CQCH1(0 To 4) As Double
Dim CQCH2(0 To 4) As Double
Dim CH1M(0 To 4) As Double
Dim CH2M(0 To 4) As Double
Dim CH1P(0 To 4) As Double
Dim CH2P(0 To 4) As Double
Dim CHs(0 To 4) As Double
Dim CHsP(0 To 4) As Double
Dim gMgr As Double
Dim gMgNivelyS As Double
Dim FeSiMg As Double
Dim SiFeSiMg As Double
Dim Inoc As Double
Dim PosInoc As Double
Dim Rec As Double
Dim FeSi As Double
Dim FeMn As Double
Dim FeMnE As Double
Dim FeMnC As Double
Dim NodulCantidad As Double
Dim SienNodul As Double
Dim SienNodulEf As Double
Dim Si As Double
Dim SiMax As Double
Dim SiMin As Double
Dim SMax As Double
Dim Cu As Double
Dim CuP As Double
Dim CuCH1 As Double
Dim CuCH2 As Double
```

Private Sub chkBlock\_Click()

If chkBlock.Value = 1 Then

For i = 0 To 5

txtCQCH2(i).Text = txtCQCH1(i).Text

txtCQCH2(i).Enabled = False

txtCH2.Enabled = False

Next i

Else

```

For i = 0 To 5
    txtCQCH2(i).Enabled = True
    txtCH2.Enabled = True
Next i
End If
End Sub

Private Sub chkInoc_Click(Index As Integer)
    If chkInoc(0) <> 1 Then
        txtInoc.Enabled = False
    Else
        txtInoc.Enabled = True
    End If
    If chkInoc(1) <> 1 Then
        txtPInoc.Enabled = False
    Else
        txtPInoc.Enabled = True
    End If
End Sub

Private Sub cmdAceptar_Click()
    BaseCalc = txtCarga.Text
    For i = 0 To 4
        txtCQR(5 + i).Text = Round(txtCQR(i).Text, 3)
        txtCQR(10 + i).Text = Round(txtCQR(5 + i).Text, 3)
        CQR(i) = txtCQR(i).Text 'composición Química requerida
        Ef1(i) = txtEficiencia(i) 'Eficiencias de las chatarras
        txtCQRMasa(i).Text = Round((BaseCalc * 1000 * CQR(i) / 100) / (Ef1(i) / 100), 3)
        txtCQRMasa(i + 5).Text = txtCQRMasa(i).Text
        CH1 = txtCH1.Text
        CQCH1(i) = txtCQCH1(i).Text 'Composición química CH1
        txtCH1Masa(i).Text = Round(CH1 * 1000 * CQCH1(i) / 100, 3) 'Masa de CH1
        CH1M(i) = txtCH1Masa(i)
        CH2 = txtCH2.Text
        CQCH2(i) = txtCQCH2(i).Text 'Composición química CH2
        txtCH2Masa(i).Text = Round(CH2 * 1000 * CQCH2(i) / 100, 3)
        CH2M(i) = txtCH2Masa(i).Text
        txtCH1P(i).Text = Round(CH1M(i) * 100 / (BaseCalc * 1000), 3) '% de CH1
        CH1P(i) = txtCH1P(i)
        txtCH2P(i).Text = Round(CH2M(i) * 100 / (BaseCalc * 1000), 3) '% de CH2
        CH2P(i) = txtCH2P(i)
        CHs(i) = CH1M(i) + CH2M(i)
        txtCH12Masa(i).Text = CHs(i)
        CHsP(i) = CHs(i) / 1000 / BaseCalc * 100
        txtCH12P(i).Text = Round(CHsP(i), 3)
    Next i
    'Carbón equivalente    'Carbón equivalente    'Carbón equivalente    'Carbón
    equivalente
    txtCEquiv.Text = Round(CQR(0) + 1 / 3 * (CQR(1) + CQR(4)), 3)
    '-----
    'Nodulizante    'Nodulizante    'Nodulizante    'Nodulizante    'Nodulizante
    If optTipo(0).Value = True Then
        fraNodulizante(1).Caption = "Nodulizante 5% Mg"
        NodulCantidad = txtCMg(0).Text
        SienNodul = txtComposiciónFerroaleaciones(2).Text
        SienNodulEf = txtEficienciaFerroaleaciones(2).Text
        txtNivel.Text = txtNivelMg(0).Text

```

```

EfMg = txtEficienciaMg(0).Text
Else
    fraNodulizante(1).Caption = "Nodulizante 10% Mg"
    NodulCantidad = txtCMg(1).Text
    SienNodul = txtComposiciónFerroaleaciones(4).Text
    SienNodulEf = txtEficienciaFerroaleaciones(4).Text
    txtNivel.Text = txtNivelMg(1).Text
    EfMg = txtEficienciaMg(1).Text
End If
gMgr = CHs(3) * 24.32 / 32.06 'Gramos de Mg necesarios para reaccionar
gMgNivelyS = BaseCalc * 1000 * txtNivel.Text / 100 + gMgr
txtMgMasa.Text = Round(gMgNivelyS, 3)
FeSiMg = gMgNivelyS * 100 / NodulCantidad * 100 / EfMg
txtFeSiMgMasa.Text = Round(FeSiMg, 3)
SiFeSiMg = FeSiMg * SienNodul / 100
txtSiFeSiMg = Round(SiFeSiMg, 3)
If chkInoc(0) = 1 Then 'Inoculación
    Inoc = BaseCalc * 1000 * txtInoc.Text / 100 * 100 / txtComposiciónFerroaleaciones(1)
Else
    Inoc = 0
End If
If chkInoc(1) = 1 Then
    PosInoc = BaseCalc * 1000 * txtPInoc.Text / 100 * 100 /
txtComposiciónFerroaleaciones(3)
Else
    PosInoc = 0
End If
txtInocMasa.Text = Round(Inoc, 3)
txtPInocMasa.Text = Round(PosInoc, 3)
Rec = (txtCQRMasa(0).Text - CHs(0)) * 100 / txtComposiciónRec.Text * 100 /
txtEficienciaRec
txtRecMasa.Text = Round(Rec, 3)
Si = txtCQRMasa(1).Text - (Inoc * txtComposiciónFerroaleaciones(1) / 100) - (PosInoc *
txtComposiciónFerroaleaciones(3) / 100) - SiFeSiMg - CHs(1) 'Silicio para FeSi
FeSi = Si * 100 / txtComposiciónFerroaleaciones(0) * 100 / txtEficienciaFerroaleaciones(0)
txtFeSiMasa.Text = Round(FeSi, 3)
If FeSi >= 0 Then
    txtFeSiMasa.BackColor = &H80000013
Else
    txtFeSiMasa.BackColor = &H8080FF
End If
sstHoja.Tab = 1
For i = 0 To 2
    txtCQPT(i).Text = txtCQR(i).Text
    txtCQPTM(i).Text = txtCQRMasa(i + 5).Text
Next i
txtCQPT(1).Text = Round((Si * 100 / 1000 / BaseCalc) + CHs(1) * 100 / 1000 / BaseCalc,
3)
txtCQPTM(1).Text = Round(txtCQPT(1).Text * BaseCalc / 100 * 1000 * 100 /
txtEficiencia(1), 3)
txtCQPTM(0).Text = Round(txtCQPT(0).Text * BaseCalc / 100 * 1000 * 100 /
txtEficiencia(0), 3)
For i = 3 To 4
    txtCQPT(i).Text = txtCH12P(i)
    txtCQPTM(i).Text = CHs(i)
Next i
FeMnC = txtComposiciónFerroaleaciones(5).Text 'Cálculo de FeMn

```

```

FeMnE = txtEficienciaFerroaleaciones(5).Text
FeMn = (txtCQRMasa(2) - CHs(2)) * 100 / FeMnC * 100 / FeMnE
txtFeMnMasa.Text = Round(FeMn, 3)
If FeMn >= 0 Then
    txtFeMnMasa.BackColor = &H80000013
Else
    txtFeMnMasa.BackColor = &H8080FF
End If
' Cobre    Cobre    Cobre    Cobre    Cobre    Cobre    Cobre    Cobre    Cobre
CuP = txtCQR(15).Text '% de cobre requerido
txtCQR(17).Text = CuP
txtCQRMasa(10).Text = CuP / 100 * BaseCalc * 1000
CuCH1 = CH1 * 1000 * txtCQCH1(5) / 100
CuCH2 = CH2 * 1000 * txtCQCH2(5) / 100
txtCH1Masa(5).Text = CuCH1
txtCH2Masa(5).Text = CuCH2
txtCH1P(5).Text = CuCH1 / 1000 / BaseCalc * 100
txtCH2P(5).Text = CuCH2 / 1000 / BaseCalc * 100
txtCH12Masa(5).Text = CuCH1 + CuCH2
txtCH12P(5).Text = (CuCH1 + CuCH2) / 1000 / BaseCalc * 100
txtCuMasa.Text = Round(txtCQRMasa(10).Text - (CuCH1 + CuCH2), 3) ' Cobre a agregar
txtCQRMasa(11).Text = txtCQRMasa(10).Text
txtCQR(16).Text = txtCQR(17).Text
txtCQPTM(5).Text = txtCQRMasa(10).Text
txtCQPT(5).Text = txtCQR(17).Text
If txtCQRMasa(10).Text - (CuCH1 + CuCH2) < 0 Then
    txtCQPT(5).Text = txtCH12P(5).Text
    txtCQPTM(5).Text = txtCH12Masa(5).Text
End If
cmdVery.Enabled = True
cmdPrint.Enabled = True
End Sub

Private Sub cmdPrint_Click()
    PrintForm
End Sub

Private Sub cmdSalir_Click()
    End
End Sub

Private Sub cmdVery_Click()
    For i = 0 To 4
        txtAjuste(i).Text = ""
        txtAjuste(1).BackColor = &HFFFFFF
    Next i
    If txtCQP(0) = "" Or txtCQP(1) = "" Or txtCQP(2) = "" Or txtCQP(3) = "" Or txtCQP(4) = ""
    Or txtCQP(5) = "" Then
    Else
        For i = 0 To 4
            txtCQPMasa(i) = Round(txtCQP(i) * 1000 * BaseCalc / 100 * 100 / txtEficiencia(i), 3)
            picAmbar(3 + i).Visible = False
            picRed(3 + i).Visible = False
            picGreen(3 + i).Visible = False
        Next i
        Rec = txtCQRMasa(0) - txtCQPMasa(0) 'Carbono
        If txtCQP(0) >= 3.5 And txtCQP(0) <= 3.8 Then

```

```

picGreen(3).Visible = True
picred(3).Visible = False
txtAjuste(0) = Round(Rec, 3)
txtAjuste(0).BackColor = &HFFFFFF
Else
picred(3).Visible = True
picGreen(3).Visible = False
If txtCQP(0) <= 3.65 Then
txtAjuste(0).BackColor = &HFFFFFF
txtAjuste(0) = Round(Rec, 3)
End If
If txtCQP(0) > 3.65 Then
txtAjuste(0).BackColor = &H8080FF
txtAjuste(0) = Round(Rec, 3)
End If
End If
SMax = txtCH12P(3)
If txtCQP(3) <= SMax Then          'Azufre
picGreen(6).Visible = True
picred(6).Visible = False
FeSiMg = 0
SiFeSiMg = 0
Else
picred(6).Visible = True
picGreen(6).Visible = False
If txtCQP(3) > SMax And txtCQP(1) < txtCQPT(1) Then
gMgr = txtCQPMasa(3) * 24.32 / 32.06          'Gramos de Mg necesarios para
reaccionar
gMgNivelyS = BaseCalc * 1000 * txtNivel.Text / 100 + gMgr
FeSiMg = gMgNivelyS * 100 / NodulCantidad * 100 / EfMg
SiFeSiMg = FeSiMg * SienNodul / 100
txtAjuste(2) = Round(FeSiMg, 3)
txtAjuste(2).BackColor = &HFFFFFF
If SiFeSiMg >= txtCQRMasa(1) Then
txtAjuste(2) = Round(FeSiMg, 3)
txtAjuste(2).BackColor = &H8080FF
End If
End If
End If
SIMin = txtCQPT(1) - 0.25          'Silicio  Ajuste de maximos y minimos
para el silicio
SiMax = txtCQPT(1) + 0.25
If txtCQP(3) > SMax And txtCQP(1) < txtCQPT(1) Then
Si = txtCQRMasa(1).Text - txtCQPMasa(1).Text - SiFeSiMg - (Inoc *
txtComposiciónFerroaleaciones(1) / 100) - (PosInoc * txtComposiciónFerroaleaciones(3) /
100) 'Silicio para FeSi
FeSi = Si * 100 / txtComposiciónFerroaleaciones(0) * 100 /
txtEficienciaFerroaleaciones(0)
txtAjuste(1).Text = Round(FeSi, 3)
txtAjuste(1).BackColor = &HFFFFFF
End If
If txtCQP(1) < txtCQPT(1) And txtCQP(3) <= SMax Then
Si = txtCQPTM(1).Text - txtCQPMasa(1).Text          'solo para ajuste de FeSi
FeSi = Si * 100 / txtComposiciónFerroaleaciones(0) * 100 /
txtEficienciaFerroaleaciones(0)
txtAjuste(1).Text = Round(FeSi, 3)
txtAjuste(1).BackColor = &HFFFFFF

```



```

End If
If txtCQP(1) >= SiMin And txtCQP(1) <= SiMax Then
    picGreen(4).Visible = True
    picred(4).Visible = False
Else
    picred(4).Visible = True
    picGreen(4).Visible = False
End If
If txtCQP(2) <= 0.6 Then                'Manganeso
    picGreen(5).Visible = True
    picred(5).Visible = False
Else
    picred(5).Visible = True
    picGreen(5).Visible = False
End If
FeMn = (txtCQPTM(2) - txtCQPMasa(2).Text) * FeMnC / 100 * 100 / FeMnE
txtAjuste(3).Text = Round(FeMn, 3)
txtAjuste(3).BackColor = &HFFFFFF
If FeMn < 0 Then
    txtAjuste(3).BackColor = &H8080FF
Else
    txtAjuste(3).BackColor = &HFFFFFF
End If
If txtCQP(4) <= 0.05 Then                'Fosforo
    picGreen(7).Visible = True
    picred(7).Visible = False
Else
    picred(7).Visible = True
    picGreen(7).Visible = False
End If
If txtCQP(5) <= 0.5 Then                ' cobre
    picGreen(0).Visible = True
    picred(0).Visible = False
Else
    picred(0).Visible = True
    picGreen(0).Visible = False
End If
txtCQPMasa(5).Text = Round(txtCQP(5).Text / 100 * BaseCalc * 1000, 3)
Cu = txtCQPTM(5).Text - txtCQPMasa(5).Text
txtAjuste(4).Text = Cu
If Cu >= 0 Then
    txtAjuste(4).BackColor = &HFFFFFF
Else
    txtAjuste(4).BackColor = &H8080FF
End If
If txtAjuste(1).Text = "" Then
    txtAjuste(1).Text = 0
End If
If txtAjuste(2).Text = "" Then
    txtAjuste(2).Text = 0
End If
End If
End Sub

Private Sub optTipo_Click(Index As Integer)
    If optTipo(0).Value = True Then
        txtEficienciaMg(0).BackColor = &H80000013
    End If
End Sub

```

```

txtNivelMg(0).BackColor = &H80000013
txtCMg(0).BackColor = &H80000013
txtComposiciónFerroaleaciones(2).BackColor = &H80000013
txtEficienciaFerroaleaciones(2).BackColor = &H80000013
txtEficienciaMg(1).BackColor = &H8000000E
txtNivelMg(1).BackColor = &H8000000E
txtCMg(1).BackColor = &H8000000E
txtComposiciónFerroaleaciones(4).BackColor = &H8000000E
txtEficienciaFerroaleaciones(4).BackColor = &H8000000E
Else
txtEficienciaMg(1).BackColor = &H80000013
txtNivelMg(1).BackColor = &H80000013
txtCMg(1).BackColor = &H80000013
txtComposiciónFerroaleaciones(4).BackColor = &H80000013
txtEficienciaFerroaleaciones(4).BackColor = &H80000013
txtEficienciaMg(0).BackColor = &H8000000E
txtNivelMg(0).BackColor = &H8000000E
txtCMg(0).BackColor = &H8000000E
txtComposiciónFerroaleaciones(2).BackColor = &H8000000E
txtEficienciaFerroaleaciones(2).BackColor = &H8000000E
End If
End Sub

Private Sub txtCH1_Change()
Blank txtCH1
If txtCH1.Text <> "" And txtCH1.Text <> "." Then
txtCH2.Text = txtCarga.Text - txtCH1.Text
End If
End Sub
Sub Blank(N As TextBox)
M = Right(N, 1)
If M <> "." And M <> "0" Then
O = Val(M)
If O = 0 Then
N = ""
End If
End If
End Sub

Private Sub txtCH2_Change()
Blank txtCH2
If txtCH2.Text <> "" And txtCH2.Text <> "." Then
txtCH1.Text = txtCarga.Text - txtCH2.Text
End If
End Sub

Private Sub txtComposiciónFerroaleaciones_Change(Index As Integer)
Blank txtComposiciónFerroaleaciones(Index)
End Sub

Private Sub txtComposiciónRec_Change()
Blank txtComposiciónRec
End Sub

Private Sub txtCQCH1_Change(Index As Integer)
Blank txtCQCH1(Index)

```

```
If chkBlock.Value = 1 Then
    txtCQCH2(Index).Text = txtCQCH1(Index).Text
End If
End Sub

Private Sub txtCQCH2_Change(Index As Integer)
    Blank txtCQCH2(Index)
End Sub

Private Sub txtCQP_Change(Index As Integer)
    Blank txtCQP(Index)
End Sub

Private Sub txtCQR_Change(Index As Integer)
    Blank txtCQR(Index)
End Sub

Private Sub txtEficiencia_Change(Index As Integer)
    Blank txtEficiencia(Index)
End Sub

Private Sub txtEficienciaFerroaleaciones_Change(Index As Integer)
    Blank txtEficienciaFerroaleaciones(Index)
End Sub

Private Sub txtEficienciaMg_Change(Index As Integer)
    Blank txtEficienciaMg(Index)
End Sub

Private Sub txtEficienciaRec_Change()
    Blank txtEficienciaRec
End Sub

Private Sub txtInoc_Change()
    Blank txtInoc
End Sub

Private Sub txtNivelMg_Change(Index As Integer)
    Blank txtNivelMg(Index)
End Sub

Private Sub txtPINoc_Change()
    Blank txtPINoc
End Sub
```

## APÉNDICE B

### ELEMENTOS REQUERIDOS COMO RESULTADO DEL BALANCE DE CARGA.

A continuación se presentan los gramos de recarburante (Rec), ferroaleaciones (FeSi, FeMn), nodulizante (FeSiMg), cobre (Cu), inoculante (Inoc), y Post-Inoculante (Post-Inoc) incorporados al baño líquido.

Los gramos que hacen referencia a la C.Q.P. 1 y a la C.Q.P. 2, son el resultado del balance de carga y del ajuste respectivos.

Finalmente en la tabla adjunta a las ferroaleaciones se muestran las cantidades empleadas en el tratamiento de nodulización, así como en la inoculación y post-inoculación.

Tabla 1. Componentes adicionados para la corrida 1 (0.035% Nivel).

| Ferroaleación | Cantidad (ajuste) (g) |              |
|---------------|-----------------------|--------------|
|               | C.Q.P. 1 (g)          | C.Q.P. 2 (g) |
| Rec           | 664.466               | 87.168       |
| FeSi          | 254.519               | 0            |
| FeMn          | 93.025                | 0            |
| Cu            | 36.085                | 0            |

| Tratamiento  | Cantidad (g) |
|--------------|--------------|
| FeSiMg(5%Mg) | 364.154      |
| Inoc         | 80.769       |
| Post Inoc    | 80.769       |

Tabla 2. Componentes adicionados para la corrida 2 (0.035% Nivel).

| Ferroaleación | Cantidad (Ajuste) (g) |              |
|---------------|-----------------------|--------------|
|               | C.Q.P. 1 (g)          | C.Q.P. 2 (g) |
| Rec           | 309.321               | 22.999       |
| FeSi          | 394.282               | 0            |
| FeMn          | 86.119                | 0            |
| Cu            | 46.34                 | 0            |

| Tratamiento  | Cantidad (g) |
|--------------|--------------|
| FeSiMg(9%Mg) | 207.303      |
| Inoc         | 80.769       |
| Post Inoc    | 80.769       |

Tabla 3. Componentes adicionados para la corrida 3 (0.022% Nivel).

| Ferroaleación | Cantidad (Ajuste) (g) |              |
|---------------|-----------------------|--------------|
|               | C.Q.P. 1 (g)          | C.Q.P. 2 (g) |
| Rec           | 150.898               | 114.459      |
| FeSi          | 303.869               | 0            |
| FeMn          | 111.446               | 0            |
| Cu            | 45.5                  | 0            |

| Tratamiento  | Cantidad (g) |
|--------------|--------------|
| FeSiMg(5%Mg) | 227.388      |
| Inoc         | 80.769       |
| Post Inoc    | 80.769       |

Tabla 4. Componentes adicionados para la corrida 4 (0.022% Nivel).

| Ferroaleación | Cantidad (Ajuste) (g) |              |
|---------------|-----------------------|--------------|
|               | C.Q.P. 1 (g)          | C.Q.P. 2 (g) |
| Rec           | 188.585               | 62.459       |
| FeSi          | 310.186               | 0            |
| FeMn          | 96.321                | 0            |
| Cu            | 45.325                | 0            |

| Tratamiento  | Cantidad (g) |
|--------------|--------------|
| FeSiMg(5%Mg) | 244.766      |
| Inoc         | 80.769       |
| Post Inoc    | 80.769       |

Tabla 5. Componentes adicionados para la corrida 5 (0.018% Nivel).

| Ferroaleación | Cantidad (Ajuste) (g) |              |
|---------------|-----------------------|--------------|
|               | C.Q.P. 1 (g)          | C.Q.P. 2 (g) |
| Rec           | 219.933               | 99.707       |
| FeSi          | 280.245               | 15.287       |
| FeMn          | 93.366                | 0            |
| Cu            | 43.575                | 0            |

| Tratamiento  | Cantidad (g) |
|--------------|--------------|
| FeSiMg(5%Mg) | 213.988      |
| Inoc         | 80.769       |
| Post Inoc    | 80.769       |

## **APÉNDICE C**

Patrón propuesto por T. Kimura y C.R. Loper Jr., en el que se presentan diferentes formas de grafito precipitado en una fundición colada, este grafito puede presentarse en forma de hojuelas, en forma de vermículos, en forma esferoidal o una combinación de grafito vermicular y grafito esferoidal, este patrón tiene la siguiente clasificación a 100 aumentos, sin ataque.

De la microestructura No. 1 a la No. 4 contiene 100% de grafito en forma de hojuelas.

La microestructura No. 5 y No. 6 contienen 100% de grafito en forma vermicular.

La microestructura No. 7, contiene 96% de grafito en forma vermicular 4% de grafito esferoidal.

La microestructura No. 8 contiene 91% de grafito en forma vermicular y 9% de grafito esferoidal.

La microestructura No. 9 contiene 85% de grafito en forma vermicular y 15% de grafito esferoidal.

La microestructura No. 10 contiene un 75% de grafito en forma vermicular y 25% de grafito esferoidal.

La microestructura No. 11 contiene un 65% de grafito en forma vermicular y 35% de grafito esferoidal.

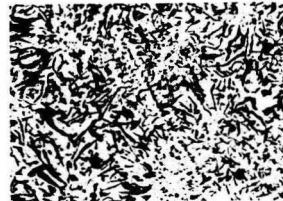
La microestructura No. 12 contiene un 10% de grafito en forma vermicular y 90% de grafito esferoidal.



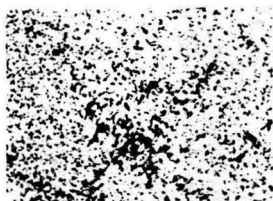
No. 1



No. 2



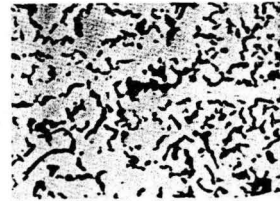
No. 3



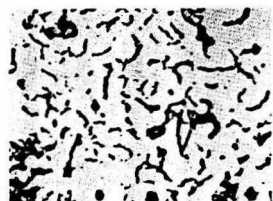
No. 4



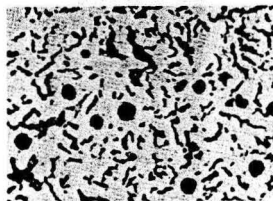
No. 5



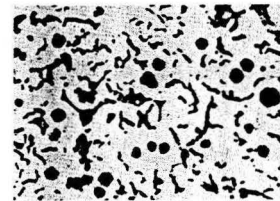
No. 6



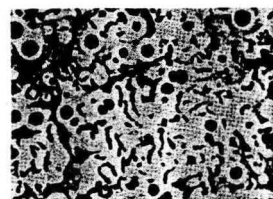
No. 7 4% S.G.



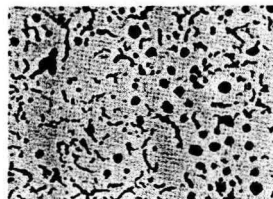
No. 8 9% S.G.



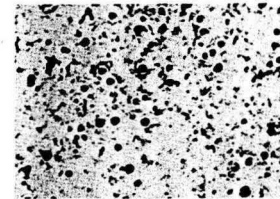
No. 9 15% S.G.



No. 10 25% S.G.



No. 11 35% S.G.



No. 12 90% S.G.

Figura 1. Clasificación y cantidad de grafito en forma de hojuelas, vermicular y esferoidal  
Patrón propuesto por T. Kimura y C.R. Loper Jr.