



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTA DE QUIMICA

“DISEÑO, CONSTRUCCION Y OPERACIÓN DE
UN HORNO CUBILOTE PARA FABRICACION
DE HIERRO NODULAR”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE INGENIERO
QUIMICO METALURGICO

PRESENTA:

LUIS FERMIN SALVADOR RAMIREZ

DIRECTOR DE TESIS:

M. en I. AGUSTIN GERARDO RUIZ TAMAYO





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: SERGIO GARCIA GALAN
VOCAL: ARTURO ALEJANDRO SANCHEZ SANTIAGO
SECRETARIO: AGUSTIN GERARDO RUIZ TAMAYO
1er. SUPLENTE: ADRIAN MANUEL AMARO VILLEDA
2° SUPLENTE: EUSEBIO CANDIDO ATLATENCO TLAPANCO

LUGAR DONDE SE DESARROLLO EL TEMA

Fundidora Industrial de Tlaxcala, S. A. de C. V. Profesor Francisco Lara
León No. 3 Col. San Sebastián, San Pablo del Monte Tlaxcala C.P 90790
Tlaxcala

ASESOR DE TEMA: _____

M. en I. Agustín Gerardo Ruiz Tamayo

SUPERVISOR TÉCNICO: _____

M. en M. Eusebio Cándido Atlatenco Tlapanco

SUSTENTANTE: _____

Luis Fermín Salvador Ramí

Índice

Resumen.....	1
Objetivo General.	3
Objetivos particulares.	3
Hipótesis.....	3
Capítulo 1. Introducción	1
Capítulo 2. Antecedentes y fundamentos.....	4
2.1 Clasificación de los hornos según sus fuentes de calor.	4
2.2 Horno cubilote.....	9
2.2.1 Partes principales de un horno de cubilote. [2].....	10
2.3.1 Encendido.....	15
2.3.2 Introducción de la carga.....	16
2.3.3 Reparación.....	16
2.4 Materiales de carga para el horno de cubilote.	17
2.4.1 Tamaño y peso de la chatarra cargada al horno de cubilote.	18
2.4.2 Ganancia y pérdidas de elementos durante la fusión en el horno de cubilote	19
2.4.3 Disminución de los incrementos de azufre, durante la fusión en el horno de cubilote, de las cargas de hierro.....	19
2.4.4 Condiciones oxidantes de la fusión en el cubilote.	20
2.4.5 Combustión del combustible en el horno de cubilote.	21
2.5 División del horno de cubilote en zonas.....	22
2.5.1 Cambios del metal durante la fusión.....	23
2.5.2 Formación y acción de escorias.....	27
2.6 Influencia de los elementos, presentes en hierros colados, sobre sus propiedades físicas. ..	29
2.7 Fundamentos de la metalurgia de la fundición con grafito esferoidal.	33
2.8 Composición química del hierro base.	36
2.8.1 Tratamiento de nodularización.	38
2.8.2 Tratamiento de inoculación.....	39
2.8.2.1 Métodos de inoculación.....	40
2.9 Influencia de los elementos de aleación en el hierro nodular.....	41
Capítulo 3. Desarrollo experimental.	45
3.1 Diseño y construcción del horno de cubilote.....	45

3.2 Selección de chatarras y pruebas de fusión realizadas en el horno de cubilote.	50
3.3 Caracterización metalográfica y ensayo de dureza Brinell	
3.4 Operación del horno.....	53
Capítulo 4. Resultados y análisis.	55
4.1 Horno cubilote.....	55
4.2 Fusión, caracterización microestructural y pruebas de dureza Brinell.	63
4.2.1 <i>Tratamientos al metal líquido.</i>	72
4.3 Variación de las composiciones químicas en el horno de cubilote.....	84
Capítulo 5. Conclusiones.	92
Bibliografía.	94
Sugerencias:	96
Seguimientos:.....	96
Anexo 1.....	97
<i>Cálculo del Sistema de colada para modelo de pieza escalonada.</i>	97
Anexo 2.....	100

Índice de figuras

<i>Figura 1. Representación de: (A) Alto Horno y (B) Horno de Cubilote.....</i>	<i>4</i>
<i>Figura 2. Representación de: (A) Horno de Hogar abierto y (B) Horno de Reverbero.</i>	<i>5</i>
<i>Figura 3. Representación de: (A) Horno de crisol y (B) Horno de crisol basculante.....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 4. Horno de inducción.</i>	<i>6</i>
<i>Figura 5. Horno de arco eléctrico.</i>	<i>7</i>
<i>Figura 6. Representación de las principales partes que conforman al horno de cubilote.</i>	<i>11</i>
<i>Figura 7. Zonas del horno de cubilote.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 8. Diagramas de fases Fe-Fe₃C y Fe-Cg.</i>	<i>34</i>
<i>Figura 9 diseño del horno cubilote, Refractario colocado en el interior del horno.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 10. Pieza empleada en la Prueba 1 y 2 para la caracterización microestructural y en la prueba de dureza Brinell.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 11. Pieza empleada en la prueba 3 para la caracterización microestructural y en la prueba de dureza Brinell.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 12. Plano del horno de cubilote.</i>	<i>58</i>
<i>Figura 13. Construcción de la caja de viento y zona de toberas.</i>	<i>59</i>
<i>Figura 14. Construcción del área inferior de horno (canal de sangrado).</i>	<i>59</i>
<i>Figura 15. Motor e impulsor utilizados para insufflar aire en las toberas.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 16. Horno terminado listo para su operación.</i>	<i>61</i>
<i>Figura 17. Selección de las chatarras para el horno de cubilote.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 18. Distribución de componentes en la olla de tratamiento.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 19. Pieza de hierro nodular seccionada.</i>	<i>75</i>
<i>Figura 20. % de nodularidad respecto al nivel de inoculación y cargas en el horno.</i>	<i>83</i>
<i>Figura 21. Relación de cargas al horno, inoculación y dureza Brinell.</i>	<i>83</i>
<i>Figura 22. Porcentaje de ferrita en relación a las cargas empleadas en el horno.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 23. Variaciones del %Carbono durante las fusiones realizadas.</i>	<i>85</i>
<i>Figura 24. Variaciones del %Silicio durante las fusiones realizadas.</i>	<i>85</i>
<i>Figura 25. Variaciones del % de manganeso durante las fusiones realizadas.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 26. Variaciones del % de fosforo durante las fusiones realizadas.</i>	<i>86</i>
<i>Figura 27. Variaciones del % de azufre durante las fusiones realizadas.</i>	<i>87</i>
<i>Figura 28. Variaciones del % de cobre durante las fusiones realizadas.</i>	<i>87</i>
<i>Figura 29. Variaciones del % de magnesio durante las fusiones realizadas.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 30. Determinación del factor de fricción.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 31. Determinación del tiempo de llenado.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 32. Patrones para determinar el tamaño de nódulo en el hierro nodular evaluadas a un aumento de 100X sin ataque.....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 33. Patrones utilizados para evaluar la densidad de nódulos presentes. Determinadas a un aumento de 100X sin ataque.....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 34. Patrones para determinar el porcentaje de nodularidad evaluadas a un aumento de 100X sin ataque.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 35. Patrones para determinar el porcentaje de perlita y de ferrita presentes en la matriz de hierro nodular, ataque con Nital y evaluadas a un aumento de 100X.....</i>	<i>103</i>

Índice de tablas

Tabla 1. Propiedades químicas, físicas y eléctricas de los diferentes compuestos empleados como refractarios.	12
Tabla 2. Rendimiento de magnesio respecto a la temperatura del metal líquido.	38
Tabla 3. Cantidades representativas de acuerdo a la relación Coque: Chatarra (1: 8) y de la Caliza empleada por carga al horno de cubilote para la prueba 2.	51
Tabla 4. Cantidades representativas de acuerdo a la relación Coque: Chatarra (1: 8) y de la Caliza empleada por carga al horno de cubilote para la prueba 3.....	52
Tabla 5. Composiciones químicas promedio de las chatarras.	65
Tabla 6. Composición química obtenida.....	66
Tabla 7. Rendimientos de los elementos contenido en el metal líquido.....	66
Tabla 8. Composición química de las chatarras utilizadas en la fusión, 1) Ch1: Composición química de chatarra automotriz, 80 kg. 2) Ch2: Composición química promedio de arrabio. 40kg.....	67
Tabla 9. Composición química promedio requerida del hierro nodular.....	69
Tabla 10. Composición química de las fusiones obtenidas en el horno de cubilote. ...	74
Tabla 11. Caracterización de hierro nodular obtenido	76
Tabla 12. Cambio de cargas al horno de cubilote.	79
Tabla 13. Composición química obtenida (Tabla 12).....	79
Tabla 14. Caracterización de hierro nodular obtenido	80

Capítulo 1. Introducción.

Resumen.

El hierro colado es uno de los más viejos materiales ferrosos conocidos por el hombre y, hasta hace no muchos años era considerado como un material frágil y barato, con buena resistencia al desgaste, abrasión y compresión, pero con muy escasa resistencia a la tracción y prácticamente sin ductilidad.

La obtención de piezas a partir de metal líquido en forma industrial es relativamente reciente, 500 años de la era cristiana. De allí se desprende que es asombroso el desarrollo que actualmente le caracteriza, por ser el proceso de manufactura más económico en la obtención de piezas complicadas, necesarias para el impulso industrial. De allí partiendo de que la tecnología de la fundición es la aplicación de los principios científicos para obtener bienes y servicios utilitarios a la comunidad por medio de los metales al estado líquido en una primera etapa y solidificándolos por enfriamiento en la segunda.

Las fundiciones de hierro con grafito esferoidal, nodular o hierro dúctil, son materiales de alta resistencia mecánica que han experimentado un muy notable crecimiento en su aplicación durante las últimas décadas.

Existen diversos procesos para la obtención de hierro nodular, partiendo siempre de una fundición gris a la cual se le da un tratamiento al metal líquido para de esta forma obtener el hierro nodular, en la actualidad dichos procesos se realizan en hornos de inducción, sin embargo es posible con un control adecuado obtenerlo de un horno de cubilote, que puede ser definido sencillamente, como una cuba revestida de refractario, con las aberturas necesarias en la parte superior para el escape de los gases y carga de los materiales, y en el fondo para la entrada de soplado

de aire, y para la extracción del metal líquido y de la escoria. Se utiliza un combustible colocado en el fondo del cubilote (Coque), una vez encendido se dispone a agregar las cargas metálicas alternadas con más combustible e iniciando el soplado de aire, si la operación del horno es la adecuada, la fusión de la carga metálica comienza rápidamente y continuara por largo tiempo si así se desea.

El presente trabajo se realizó en la empresa FITSA ubicada en el poblado de San Pablo del Monte, Tlaxcala, donde la demanda de piezas de hierro nodular hacia la empresa va en aumento por lo que se decidió construir un horno para fabricación de dicho material, realizando el cálculo, diseño y construcción de un horno cubilote con una capacidad de 1200 kg de metal líquido por hora aproximadamente y así obtener una composición química específica al cual se le aplicará un tratamiento al metal líquido para la obtención de un hierro ductil, realizando los balances de carga y selección de las chatarras para obtener la composición química del hierro nodular requerido, así como el diseño de una olla para realizar los tratamientos necesarios al metal líquido.

Objetivo General.

- Diseñar, construir y operar un horno de cubilote para la fabricación de hierros ductiles según la norma ASTM A536.

Objetivos particulares.

- Clasificar y controlar la materia prima primaria a emplear para la obtención de hierros nodulares.
- Determinar las eficiencias por elemento para el horno de cubilote diseñado.
- Determinar la composición química a la salida del horno de cubilote para tener un control del metal base y posteriormente llevar a cabo el tratamiento de nodularización e inoculación para la fabricación de hierro nodular.
- Evaluar la calidad microestructural de los hierros nodulares obtenidos para asegurar la calidad del mismo.

Hipótesis.

- Se puede fabricar hierro nodular y controlar la composición química del metal base en un horno de cubilote de sangrado intermitente, a partir del control de la materia prima primaria, temperatura de colada y realizando los tratamientos pertinentes al metal líquido.

Capítulo 2. Antecedentes y fundamentos.

2.1 Clasificación de los hornos según sus fuentes de calor.

La clasificación general que existe de los hornos que se emplean para fundir metales o aleaciones son en base a lo que utilizan como fuente de calor [1]:

I. Hidrocarburos: Estos a su vez se clasifican en:

A. Contacto entre combustible, material y productos de la combustión: Por ejemplo, Alto horno, Horno de cubilote, **Figura 1.**

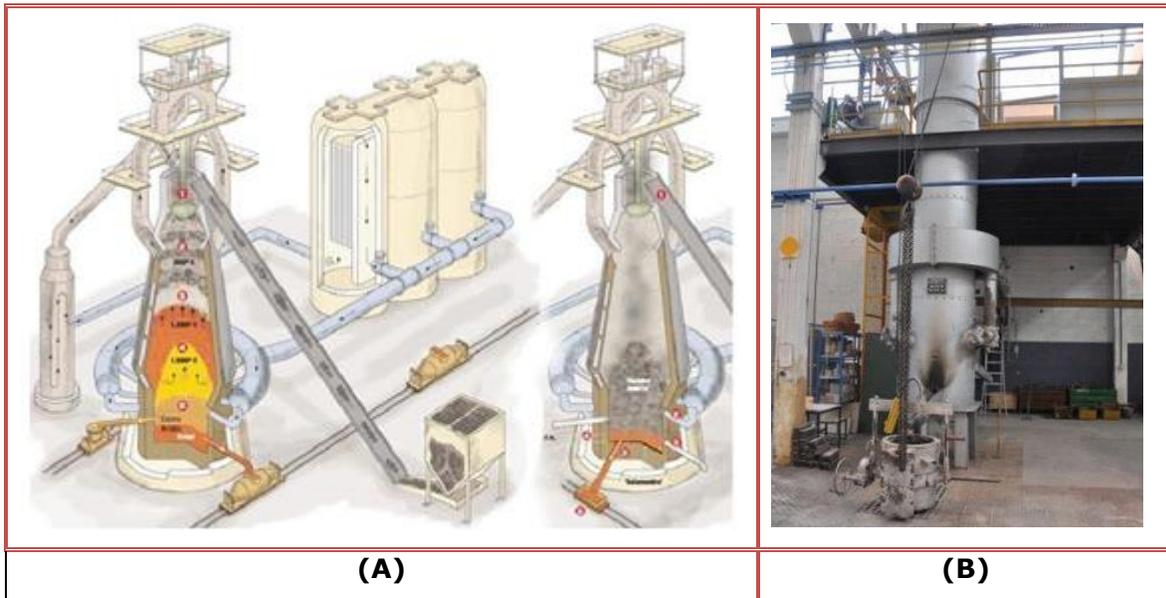


Figura 1. Representación de: (A) Alto Horno y (B) Horno de Cubilote.

B. Contacto entre materiales y productos de la combustión, pero no con los combustibles: Por ejemplo, Horno de reverbero, Horno de hogar abierto, **Figura 2.**

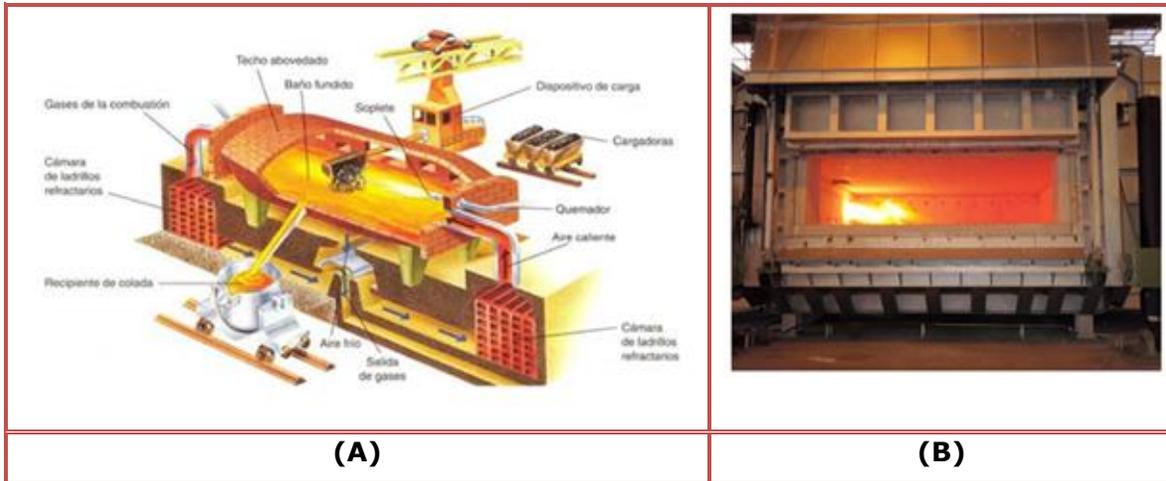


Figura 2. Representación de: (A) Horno de Hogar abierto y (B) Horno de Reverbero.

C. Sin contacto entre combustibles, materiales y productos de la combustión: Por ejemplo, Horno de crisol, Horno de crisol basculante, **Figura 3.**



Figura 3. Representación de: (A) Horno de crisol y (B) Horno de crisol basculante.

II. Eléctricos.

A. Inducción. Los hornos de inducción, **Figura 4**, se clasifican en:

1. Alta frecuencia (sin núcleo)
2. Baja frecuencia (con núcleo)

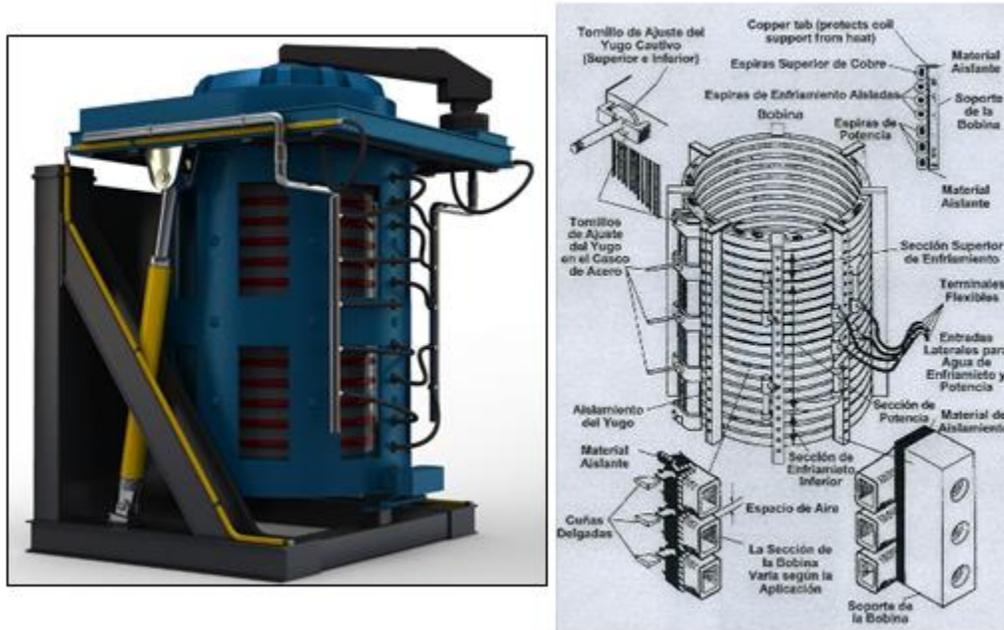


Figura 4. Horno de inducción.

B. Arco eléctrico. La clasificación de los estos hornos, **Figura 5**, es la siguiente:

1. Arco directo.
2. Arco indirecto.

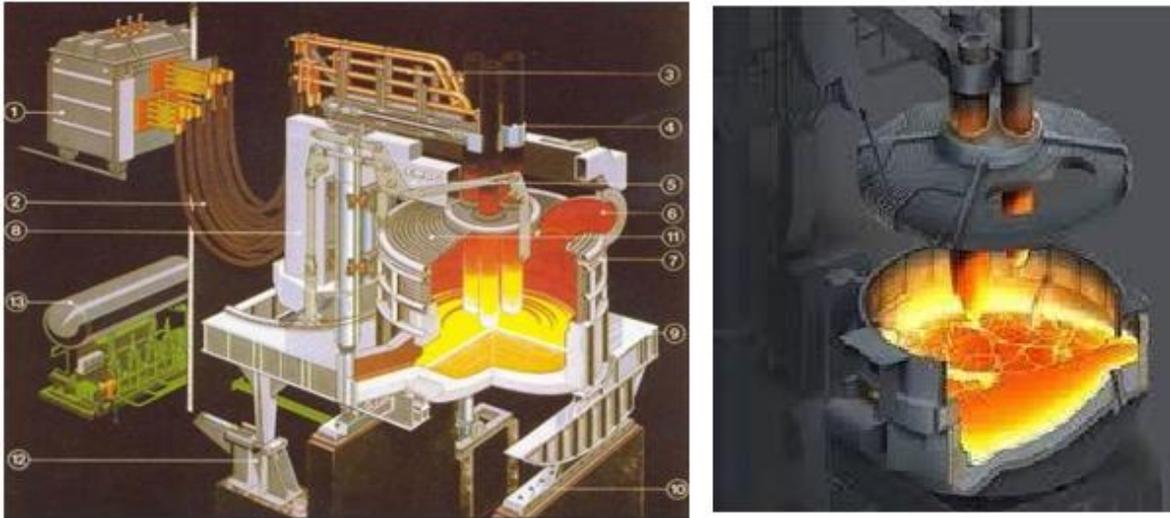


Figura 5. Horno de arco eléctrico.

La selección del tipo de horno dependerá principalmente de:

- a) Metal o aleaciones a fundir.
- b) Consideraciones del costo inicial y costo de su operación.
- c) Costo medio relativo de reparación y mantenimiento.
- d) Eficiencia de fusión, en particular la velocidad de fusión.
- e) Cantidad de metal requerido a vaciar por unidad de tiempo a la línea de moldeo.
- f) Cantidad de metal a vaciar a los moldes, dicho de otra manera, los requerimientos de producción.

2.1.1 Consideraciones en la selección del tipo de horno empleado para la fabricación de hierro nodular.

La condición fundamental durante la producción de hierro nodular es el bajo contenido de azufre en el metal base. Esta exigencia está estrechamente relacionada con la elección del equipo de fusión. En general se puede considerar que con la fusión en hornos de inducción sin núcleo, es posible cumplir de forma fácil y confiable las exigencias que se

tengan sobre la composición química. Debido a que en estos hornos no se tiene el riesgo de la resulfuración puesto que es suficiente utilizar materia prima primaria (chatarras) con bajos contenidos de azufre.

El horno de cubilote con revestimiento ácido, se utiliza extensamente para la fusión. Sin embargo, el contenido de azufre en el metal líquido aumenta, puesto que dicho elemento se encuentra principalmente en el coque, el cual muchas de las veces contiene de 1 a 1.5% de azufre.

En el horno de cubilote con revestimiento básico, el problema del azufre es menos crítico por que puede eliminarse formando una escoria apropiada. El problema es que el material refractario básico es más costoso, el proceso es más lento debido a que debe efectuarse una desulfuración.

Otro problema la presenta la temperatura del metal líquido, que por lo general es menor a la requerida para una buena nodularización. Este problema se puede solucionar soplando aire precalentado donde se presenta la mayor oxidación del metal que también dificulta la eliminación del azufre.

La composición de la carga metálica para la fusión inicial está dada por una parte por las propiedades físicas y mecánicas de las piezas a colar y por otra parte por el tipo de equipo de fusión con que se cuente.

Si se utiliza el horno de inducción para fundir la carga, la obtención de la composición química del hierro no representa ningún problema. Es suficiente con clasificar perfectamente los materiales y garantizar un bajo contenido de azufre o bien utilizar chatarra de acero bajo carbono y ajustar el % de carbono con recarburante, que se agrega al horno junto con la chatarra.

La fusión en cubilote, exige la utilización de arrabio para fundición de alta calidad o bien chatarra de hierro colado con bajo contenido de azufre y chatarra de acero con bajo carbono. Un complemento importante de la carga metálica lo constituye el retorno propio de hierro nodular.

2.2 Horno cubilote.

La palabra "cubilote" procede de la palabra latina "cupa" que significa cuba. El horno de cubilote fue construido por las fuerzas armadas de los EE.UU., en Nueva Guinea, partiendo de un tambor de aceite, y piezas de desecho, todo eso soldado en el lugar. El cubilote es, por mucho, el horno de fusión más sencillo y productivo.

El horno de cubilote moderno esta comúnmente asociado con el nombre de John Wilkinson. La fecha de su patente fue el 2 de junio de 1794. Realmente fue ideado como una mejora de la vieja forja usada durante siglos como un horno de beneficio, pero convertido para ser una unidad de fusión y desarrollado bajo esos lineamientos.

El horno de cubilote es un horno que trabaja con combustible sólido y en el cual la carga metálica, el combustible y el comburente están en íntimo contacto entre sí, de esta manera se tiene un intercambio térmico directo y activo, y, por lo tanto, un rendimiento elevado. Sin embargo, debido a este contacto entre el metal líquido, las cenizas del combustible y el oxígeno del aire, el hierro gris producido no puede ser rigurosamente controlado desde el punto de vista metalúrgico. La utilización del cubilote es considerada como el método más barato para transformar la chatarra de hierro gris y acero en hierro gris útil.

2.2.1 Partes principales de un horno de cubilote. [2]

A continuación, se describen las partes principales que conforman al horno de cubilote:

Coraza: La torre o coraza es generalmente de placa de acero, rolada en forma de secciones cilíndricas, la cual contiene y soporta el revestimiento del refractario, caja de vientos y toberas.

Cimentación: Se evalúa el peso aproximado del horno de cubilote, contemplando todos los accesorios y el revestimiento refractario. En base a lo anterior se procede a llevar a cabo la cimentación (dimensiones de la zapata).

Sección del cuerpo: Consiste de las columnas o patas de soporte, estructura de la base y placa de fondo, caja de viento y puertas del fondo.

Toberas: Facilitan el paso del aire hacia la cama de coque para llevar a cabo la combustión. Las áreas de las toberas pueden variar de $\frac{1}{10}$ y $\frac{1}{3}$ del área transversal del cubilote.

Picos para sangrado y escoriado: El orificio de sangrado está ubicado de 10 a 30 cm con respecto a la placa base y tiene forma de un cono truncado (mayor diámetro hacia el exterior del horno).

El *canal de escoria* se localiza ligeramente arriba del nivel del metal líquido, es decir, la altura aproximada que alcanza el metal líquido dentro del crisol.

Estos dos orificios están localizados por lo general a 180° uno de otro. El diámetro del orificio de ambos puede variar del 1 al 2% del diámetro interior del horno.

Aberturas de admisión de cargas: En los hornos de cubilote cargados a mano, la altura de esta abertura está relativamente baja,

aproximadamente 4.27 m (14 pulgadas) que va desde la placa del fondo hasta el umbral de la puerta de carga. Para carga mecánica, la abertura de carga está colada a un nivel más alto a 6.40 m (21 pulgadas) en promedio.

Chimenea: Debe de sobrepasar la altura del techo y estar a una distancia prudente para evitar incendios, además debe de estar cubierta por un capuchón, que funciona como un área para evitar problemas con las lluvias.

Algunos de los componentes del horno de cubilote se muestran en la **Figura 6.**

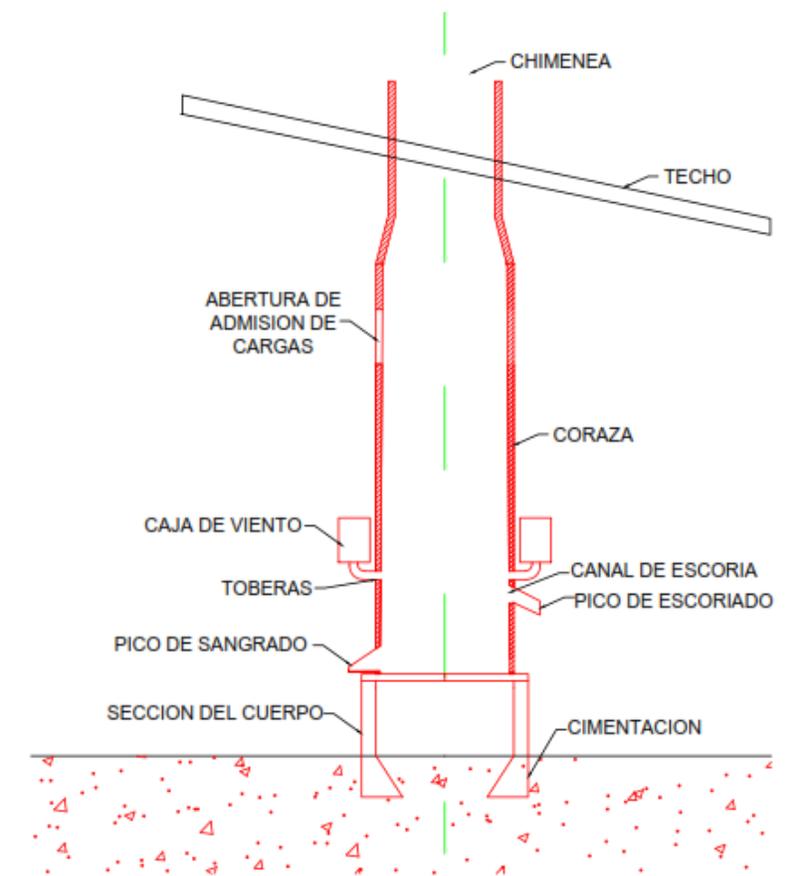


Figura 6. Representación de las principales partes que conforman al horno de cubilote.

2.2.2 Clasificación de Refractarios.

Los refractarios son materiales, que en condiciones de servicio resisten elevadas temperaturas, erosión, abrasión, impacto, ataque químico, acción de gases corrosivos. La mayor parte de los refractarios son materias cerámicas fabricadas con óxidos de elevado punto de fusión (SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , y Cr_2O_3). En la **Tabla 1**, se muestran algunas propiedades de los compuestos empleados como refractarios.

Tabla 1. Propiedades químicas, físicas y eléctricas de los diferentes compuestos empleados como refractarios.

Nombre Común	Sílice	Alúmina	Magnesia
Composición Primaria	SiO_2	Al_2O_3	MgO
Punto de fusión	1723	2050	2800
Energía libre a 1450°C, KJ/mol	-594	-758	-732
Conductividad térmica (k) W/mK, 0-1200°C	1.7	2.6	4.0
Coefficiente de expansión ($\alpha \times 10\text{E}-6$)°C 0-1200°C	12.2	8.2	13.8
Resistencia al choque térmico ($R=\sigma k/E\alpha$)	715	480	345
Densidad ρ (g/cm ³)	2.65	3.98	3.58
Costo relativo	1	5	2.5-10

A continuación, se describe brevemente la clasificación de los refractarios empleados para el revestimiento de los hornos:

Refractarios ácidos.

Incluyen las arcillas de sílice, de alúmina y refractarios de arcilla. La sílice pura a veces se utiliza para contener metal derretido. Los refractarios de arcilla por lo general son relativamente débiles, pero poco costosos. Contenidos de alúmina por arriba de aproximadamente 50% constituyen los refractarios de alta alúmina.

Refractarios Básicos.

Varios refractarios se basan en el MgO (Magnesia Opericlasa). El MgO puro tiene un punto de fusión alto, buena refractariedad y buena resistencia al ataque por los entornos que a menudo se encuentran en los procesos de fabricación de acero. Típicamente, los refractarios básicos son más costosos que los refractarios ácidos.

Refractarios Neutros.

Normalmente incluyen la cromatina y la magnesita, pueden ser utilizados para separar refractarios ácidos de los básicos, impidiendo que uno ataque al otro.

Refractarios Especiales.

El carbono, el grafito, es utilizado en muchas aplicaciones refractarias, particularmente cuando no hay oxígeno fácilmente disponible. Estos materiales refractarios incluyen la zirconia (ZrO_2), el zircón ($ZrO_2.SiO_2$) y una diversidad de nitruros, carburos y boruros.

Refractarios con Alto Contenido en Alúmina.

Estos ladrillos tienen un coeficiente de dilatación térmica muy bajo, por lo cual están preparados para soportar altas temperaturas y luego se enfrían sin llegar a presentar dilataciones o deformaciones significativas que lo afecten. Son ladrillos de alto coste porque son escasas las arcillas con que se fabrican.

Refractarios con Alto Contenido de Sílice.

Estos ladrillos pueden soportar altas temperaturas, y a diferencia de los anteriores, se dilatan de manera considerable cuando son sometidos a

fases alternativas y continuas de calor y frío. Dichos cambios bruscos de temperatura los afecta de tal modo, que finalmente los desintegra. Se los emplea en aquellos sitios donde las temperaturas altas son continuas.

Con objetivo de que el horno de cubilote pueda contener el calor y los productos fundidos, deberá estar provisto de un revestimiento refractario conveniente. La calidad y la uniformidad son necesarias, para ayudar a un descenso suave de la carga con una mínima contaminación del metal líquido, así mismo obtener escorias de basicidad apropiada, siendo necesario el uso de estos refractarios básicos o neutros, o combinaciones de los dos. El tipo de refractario básico depende de factores como:

- El grado de basicidad deseado en la escoria.
- Duración de la hornada.
- Temperaturas de operación y otros.

Los materiales más comúnmente empleados para el revestimiento original del horno de cubilote son los ladrillos de arcilla refractaria. Los revestimientos monolíticos son mezclas de arcilla refractaria y de grog (pedacería de material refractario cocido) en proporciones convenientes, apropiadamente mezclada con agua, y apisonada contra la coraza o contra un fondo de ladrillo refractario. Generalmente puede emplearse una sola clase de refractario de arcilla para revestir el cubilote desde el fondo hasta la puerta de carga, siempre que el tipo seleccionado pueda cumplir los severos requerimientos de la zona de fusión. [5]

Se han empleado los siguientes refractarios para el crisol y zona de fusión del cubilote, con diferentes grados de éxito:

- Ladrillo de cromo-magnesita.
- Ladrillo de magnesita de diversos tipos.

- Gránulos de magnesita apisonados en el lugar.
- Gránulos de magnesita aplicados con pistola de aire.
- Ladrillos de dolomita estabilizados.
- Mezclas dolomíticas apisonadas en el lugar con un pisón de madera.
- Mezclas dolomíticas aplicadas con pistola de aire.

2.3 Operación y funcionamiento del horno de cubilote.

2.3.1 Encendido.

El fondo del crisol o solera se cubre con una mezcla de pintura de grafito base agua que después se seca con leña o flama de un quemador de gas o diésel.

Aproximadamente unas 2 horas antes del inicio de la fusión, se introduce un poco de leña seca, a través de la boca de carga o puerta lateral, que se enciende hasta obtener un fuego abundante y vivo. Para lograrlo se forma un tiro natural de las corrientes de aire a través de las mirillas, de las toberas y de los orificios de sangrado y escoriado, cuando están abiertas.

Posteriormente se comienza a agregar el coque de encendido en camas de unos 32 cm para cada carga en proporción de 140kg/m² de horno. Con el coque se mezcla de un 5 a 10% de piedra caliza, como fundente. Antes de agregar una nueva capa de coque se tiene que asegurar que el coque anterior está bien encendido.

La cama de coque inicial debe alcanzar una altura de 60 a 100 cm arriba del nivel de las toberas. El nivel se comprueba introduciendo una barra por la compuerta de carga o bien una cadena con contrapeso en el extremo.

Si se desea desulfurar el coque, se aumenta la cantidad de aire del ventilador durante 4 o 5 minutos y se aviva el encendido de toda la columna de coque.

2.3.2 Introducción de la carga.

Terminado el encendido de la cama de coque se inicia la operación de carga al horno. Para lo cual se agrega sobre ella una carga de coque adicional con caliza y sobre esta capa se agrega carga metálica, a continuación, se agrega otra carga de coque y así en capas alternadas hasta llegar a la boca de carga. A partir de este momento los operarios deberán estar pendientes de mantener lleno el horno con cargas alternas a medida que las otras cargas vayan descendiendo por efecto del consumo del coque y de la fusión de las cargas metálicas. Se cierran las mirillas de las toberas y puerta lateral, se aumenta la cantidad de aire por un lapso de 5 a 8 minutos y aparecen las primeras gotas de metal líquido en el crisol y en ese momento se tapa el orificio de sangrado del metal. La cama de coque (capa de coque encendido) tiene la función de soportar toda la columna de cargas colocadas encima y debe ser tal que su altura no debe variar sensiblemente durante todo el tiempo de fusión y cuyo consumo se repone mediante la adición de cargas sucesivas de coque.

2.3.3 Reparación.

Después de cada fusión, el horno de cubilote se deja enfriar y al día siguiente se repara; lo cual consiste en la eliminación de escoria adherida a la pared, hasta llegar al refractario que no ha sufrido deterioro por causa de la fusión. Las partes afectadas se recubren entonces con material refractario nuevo y se deja reposar por lo menos 24 horas. Si las partes están muy afectadas se utiliza ladrillo refractario nuevo.

2.4 Materiales de carga para el horno de cubilote.

La chatarra utilizada en la fabricación de hierro nodular empleando horno de cubilote, consiste principalmente de:

- Arrabio.
- Chatarra de acero y de fundición clasificada.
- Retorno de hierro nodular.

Arrabio: En la actualidad la clasificación de arrabio se basa en el análisis químico. La apariencia de la fractura de arrabio colado en arena está determinada por el contenido de silicio. Uno de los beneficios principales del uso del arrabio, es que contribuye significativamente al control de la composición química.

Los contenidos de silicio son bastantes consistentes en todos los números de grado de los diferentes fabricantes, pero los contenidos de manganeso y fósforo no varían ampliamente.

Chatarra de acero y de fundición clasificada: La chatarra de acero es y seguirá siendo muy importante en la producción de hierro nodular. En muchos hornos de cubilote, las cargas metálicas están compuestas de arrabio y chatarra en proporciones diversas. Por ejemplo, se puede emplear chatarra de hierro nodular (cigüeñales) y de hierro gris (discos y tambores de freno), así como chatarra de acero bajo carbono.

Retorno de hierro nodular: Este retorno se compone principalmente de los componentes del sistema de colada (bajada, corredor, entrada), del sistema de alimentación (alimentadores o mazarotas) y de las piezas que no cumplen con las especificaciones de calidad.

2.4.1 Tamaño y peso de la chatarra cargada al horno de cubilote.

La carga metálica debe tener tamaños definidos dentro de ciertos límites, los cuales varían de acuerdo con el diámetro interno del cubilote. La fusión y el trabajo uniforme del horno dependen en gran medida de los pesos correctos de la carga y los componentes clasificados apropiadamente. En general para evitar el "puenteo" de la carga es conveniente limitar la longitud del lingote de arrabio y de los trozos de chatarra a un tercio del diámetro interior del cubilote.

Coque: el coque para el cubilote debe ser denso, duro y resistente, de un color gris plateado con una composición dentro de los límites siguientes:

- Carbono fijo - mínimo 90%
- Contenido máximo de ceniza - 10%
- Contenido máximo de azufre -0.05%

El coque, además de su función primordial de fundir la carga, juega un papel importante en la composición química del metal líquido obtenido. Su influencia es importante particularmente sobre el contenido de carbono y de azufre.

Respecto al contenido de carbono, el efecto del coque está relacionado con la influencia de la composición de sus cenizas sobre la composición de la escoria. Si el coque en la zona de la cama, donde gotea el metal líquido, está recubierto por una escoria viscosa, el pasaje de carbono del coque a las gotas se ve limitado.

La viscosidad de la escoria disminuye con la basicidad. Si el coque tiene un alto contenido de cenizas o éstas son muy ricas en sílice, y este contenido no está adecuadamente balanceado con caliza, la basicidad de

la escoria disminuye, su viscosidad aumenta y la recarburación se ve perjudicada. [3]

Piedra caliza: una buena piedra caliza apropiada como fundente para el horno de cubilote debe contener del 95 al 97% de carbonatos de calcio y magnesio y 2% máximo de sílice.

2.4.2 Aportación y pérdidas de elementos durante la fusión en el horno de cubilote.

En el cálculo de las cargas metálicas deben tomarse en cuenta las tolerancias promedio siguientes:

- Silicio: 10 a 15% de pérdida.
- Manganeso: 20 a 30% de pérdida.
- Azufre: 20 a 50% de pérdida.
- Fósforo: 1 a 2% de aportación.

Estos cambios dependen de las condiciones de operación del horno de cubilote y pueden variar ampliamente. Bajo un trabajo controlado y apropiado las pérdidas y ganancias pueden presentarse dentro de límites bien definidos.

2.4.3 Disminución de los incrementos de azufre, durante la fusión en el horno de cubilote, de las cargas de hierro.

Cuando las condiciones de operación hacen necesaria la utilización de altas proporciones de retorno o chatarra de hierro gris en la carga metálica al horno de cubilote, el contenido de azufre en el hierro gris resultante tiende a ser alto. Por lo anterior deben tomarse todas las

medidas necesarias para que el incremento quede dentro de ciertos límites, tomando en cuenta que su presencia es inevitable. En contenidos muy limitados su efecto es pequeño. Contenidos apropiados de manganeso neutralizan ese efecto nocivo.

El azufre en el hierro gris ejerce una tendencia a estabilizar los carburos. Por lo tanto, si se permite un incremento excesivo en los gases atrapados afecta la maquinabilidad de la pieza. Estos hierros son propensos a fracturarse en las secciones delgadas de la pieza.

Durante todo el tiempo que se funde el arrabio y la chatarra de hierro en el horno de cubilote, el contenido de azufre se incrementa. Mucho del incremento adicional del azufre proviene del coque y este es especialmente, en caso de coque de baja calidad y alto contenido de azufre.

Las condiciones oxidantes de fusión favorecen los altos incrementos de azufre. Esto es porque se forma óxido de hierro que pasa a la escoria y de esta manera la escoria no retiene el azufre.

2.4.4 Condiciones oxidantes de la fusión en el cubilote.

Estas condiciones resultan cuando las cargas de hierro funden demasiado cerca de las toberas. Algunas de las causas que provocan esto son:

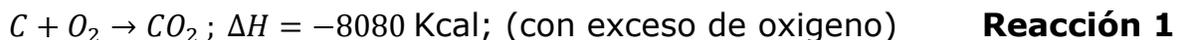
- La cama de coque es muy baja, incluso la carga originalmente, o que se haya permitido la disminución durante el transcurso del soplo.
- La utilización de cargas metálicas demasiado pesadas para las dimensiones del horno.

- La utilización de coque de baja resistencia y de naturaleza altamente reactiva y coque de tamaños pequeños lo cual permite que la carga se quemara muy rápidamente.
- Cantidad de coque demasiado pequeña utilizada en cada carga metálica.

También es posible obtener un metal oxidado cuando en las cargas metálicas se utiliza una alta proporción de chatarra y/o acero demasiado oxidados o quemados.

2.4.5 Combustión del combustible en el horno de cubilote.

Es sabido que por acción del oxígeno en el aire sobre el carbón activo a la temperatura de ignición (en el coque para fundiciones es de 600 a 700°C) se forman los gases CO y CO₂. El transcurso de la reacción de combustión, es posible explicarla como:



Estas reacciones no son reversibles y tiene lugar en la dirección de la derecha y son exotérmicas. Durante la combustión de 1Kg de carbono puro, según la **Reacción 1**, se generan 8080 Kcal y en el segundo caso de acuerdo con la **Reacción 2**, sólo se generan 2407 Kcal.

La temperatura teórica de la combustión de 1kg de carbono puro en una corriente de aire y en presencia de nitrógeno, es de 2470°C según la reacción 1. Los productos de combustión son los gases CO₂ y N₂.

La temperatura teórica de combustión de 1 Kg de carbono puro, según la reacción 2, es de 1300°C, en este caso los productos de combustión son CO y N₂. En ambos casos no se considera la disociación de los gases.

El nitrógeno como gas inerte no influye sobre el transcurso de la reacción, pero consume calor para calentarse a la temperatura de los gases de la combustión.

2.5 División del horno de cubilote en zonas.

El horno de cubilote trabaja bajo el principio de contra corriente: los materiales de la carga descienden, mientras que los gases de la combustión ascienden y transmiten el calor a la carga metálica. El aire soplado entra por las toberas a la cuba del horno y aquí se pone en contacto con el coque encendido al rojo vivo. Las altas temperaturas aceleran la combustión y con ello se forman las condiciones para la realización de toda una serie de reacciones. La presión y temperatura ambiente influyen sobre la intensidad del transcurso de estas reacciones y el exceso o la insuficiencia de oxígeno condiciona su dirección o sentido y el grado de su realización.

Las reacciones más importantes que actúan sobre todo el proceso son reacciones, durante las cuales, se forman CO y CO₂.

Con un exceso de oxígeno se forma rápidamente el CO₂; con la disminución de oxígeno esta reacción se vuelve lenta. La disminución de oxígeno y la presencia del carbono activo cambian la dirección de la reacción y esto en el sentido favorable para la formación de CO. Globalmente el transcurso de la combustión se puede explicar de la siguiente manera: durante el alejamiento desde las toberas en dirección hacia arriba el contenido de CO₂ crece rápidamente, con la disminución

del contenido de oxígeno el CO_2 se forma más lentamente y cuando el oxígeno es consumido completamente, la reacción de formación de CO_2 desaparece por completo y comienza a tener lugar en otra dirección; el CO_2 por acción del carbono activo se descompone con la formación del CO . Esto ocasiona que el aire penetre hacia el centro del horno y fluya con menos intensidad junto a las paredes de la cuba del horno.

La carga metálica que avanza hacia abajo se calienta con el calor de los gases de combustión. En dirección a las toberas la temperatura de los gases aumenta rápidamente y el metal se calienta intensamente.

La carga metálica llega a la temperatura de fusión y escurre hacia abajo y en el camino se sobrecalienta y sigue aumentando su temperatura ya en estado líquido. En la parte inferior del horno de cubilote, en el crisol, la combustión tiene lugar ya en forma lenta y los gases junto con el metal líquido se enfría (los gases más rápido que el metal).

La temperatura del metal líquido en el canal de sangrado depende de su temperatura durante la fusión y el grado de sobrecalentamiento durante su paso por la zona oxidante.

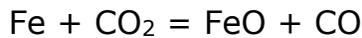
La división de la cuba del horno de cubilote en zonas es solamente teórica, sin embargo, está plenamente fundamentada por los procesos químicos y físicos que en ellas tiene lugar.

2.5.1 Cambios del metal durante la fusión.

- Zona de precalentamiento.

El calor físico de los gases de combustión se aprovecha para la eliminación de las humedades de los metales y materiales de carga y para su precalentamiento.

Entre la fase gaseosa, que se compone principalmente de CO₂ y CO, y la chatarra sólida tiene a lugar la siguiente reacción:



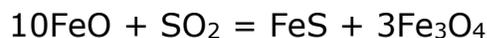
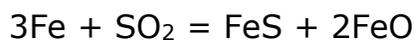
La dirección de la reacción depende del contenido de CO₂ y CO en los gases. El exceso de CO₂ desplaza la reacción hacia la derecha.

La proporción entre CO y CO₂ depende de la temperatura del medio reactivo. Debido a que en la atmósfera gaseosa predomina el CO₂, se establece en el horno de cubilote una atmósfera oxidante, que se profundiza ligeramente por la acción del bajo contenido de oxígeno libre.

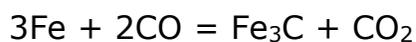
Por acción de los gases oxidantes, se forma en la superficie del metal una capa muy delgada de óxidos, la cual contiene principalmente FeO y parcialmente, Fe₃O₄, SiO₂ y MnO. El metal se oxida sólo en la superficie, bajo la capa de metal oxidado esta la capa de metal descarburado.

Esta oxidación superficial no se manifiesta sensiblemente en las pérdidas totales de metal por oxidación en el horno de cubilote.

El SO₂ presente en los gases reacciona con el hierro con la siguiente formación del sulfuro de hierro, según las reacciones siguientes:



Si aumenta el contenido de SO₂ en los gases, el metal se satura mejor de azufre. El efecto cementante de los gases de combustión es posible expresándolos mediante la siguiente ecuación:

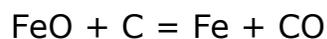
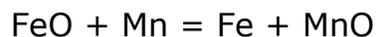
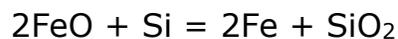


Esta reacción rara vez se lleva a cabo en la zona de precalentamiento debido a un mayor contenido de CO₂ en los gases de combustión, la reacción tiene lugar en dirección a la izquierda.

- Zona reductora – Zona de fusión.

Con el traslado de las cargas metálicas, calentadas hasta la temperatura de fusión, esta zona aumenta rápidamente su temperatura aún más. El metal líquido que escurre queda expuesto a la acción intensa de los gases de combustión y durante el constante contacto con el coque encendido al rojo vivo se valida el efecto de carbón activo.

Por acción de las altas temperaturas de los gases de combustión el metal líquido se sobrecalienta. Por una fuerte oxidación en esta zona se continúa con el aumento de la temperatura del metal líquido. El alto contenido de elementos en el metal líquido, sus óxidos, tienen una menor tensión de disociación, que la tensión de disociación del FeO, sin embargo, actúan como reductores de los óxidos de hierro, de acuerdo a las siguientes reacciones:



Un contenido particularmente alto silicio y manganeso en el metal líquido, ocasiona un efecto positivo para el transcurso de la primera y segunda reacción con cuyo efecto exotérmico se continúa en el aumento de la temperatura del metal líquido.

Las altas temperaturas del metal líquido y la atmósfera interna del horno, tienen una influencia favorable sobre el transcurso de la reducción del FeO

con ayuda del carbono, sin embargo, al contacto con el coque el hierro simultáneamente se recarbura.

La recarburación depende de la calidad del coque y el tiempo durante el cual el metal líquido está en contacto con el coque. Sobre esta recarburación también influye el contenido de carbono total en el hierro. La recarburación de un hierro con bajo contenido de carbono tiene lugar en forma un poco diferente que la recarburación de un hierro con alto contenido de carbono. La recarburación también depende del contenido de silicio en el hierro, ya que el silicio afecta negativamente a la solubilidad del carbono en la aleación.

- *Zona de combustión.*

La combustión del metal en esta zona, son los mismos que en la zona reductora, solo con la diferencia de que las reacciones de oxidación aquí tienen lugar más intensamente a consecuencia del exceso de oxígeno libre.

La temperatura de combustión aquí alcanza el máximo, así que también la velocidad de todas las reacciones es mayor al igual que la temperatura del metal.

- *Crisol y antecrisol.*

En el crisol y antecrisol se acumula el metal líquido. Las reacciones de combustión finalizan como consecuencia de la insuficiencia de oxígeno, cesa también la oxidación del metal líquido. Los últimos residuos de FeO aquí se reducen con la formación de SiO₂ y MnO, los cuales se eliminan del baño metálico y pasan a la escoria. Por acción de la escoria se produce también la desulfuración del metal.

Una escoria muy ácida no es apropiada para la desulfuración del metal.

Para la desulfuración se utiliza manganeso, el cual se combina con el azufre para formar el sulfuro de manganeso y que es de difícil fusión así que fácilmente se elimina del baño metálico.

En esta zona el metal líquido se recarbura por su contacto directo con el coque. La temperatura del metal en esta zona desciende parcialmente y es un poco más alta que la temperatura del metal líquido en el canal de sangrado. Las diferentes zonas a las que se hace referencia anteriormente, se muestran en la **Figura 7**.

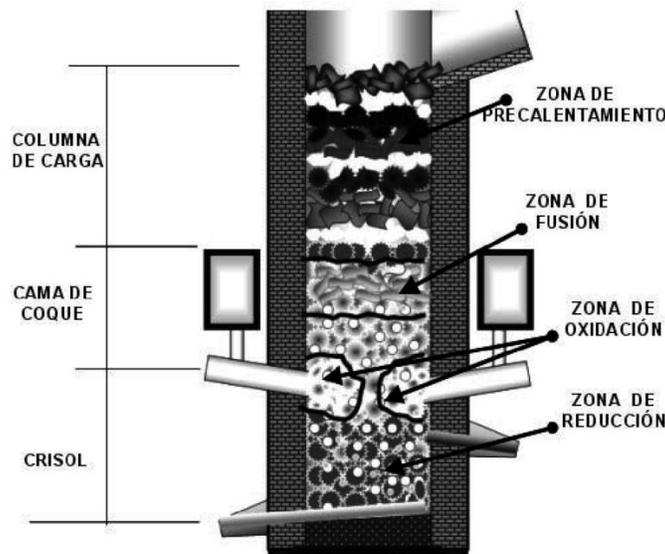


Figura 7. Zonas del horno de cubilote.

2.5.2 Formación y acción de escorias.

Durante la fusión de las chatarras en el horno de cubilote se forma escoria debido a la fusión incipiente del revestimiento refractario, la ceniza de coque, la arena adherida a los lingotes de arrabio, las piezas de colada de hierro gris y nodular de retorno y al grado de óxidos que se forman durante la fusión como los de manganeso, hierro y silicio. Debido a que todos estos componentes de la escoria tienen un carácter ácido, se

agregan al horno de cubilote fundentes de carácter básico, para disminuir la temperatura de fusión de la escoria y aumentar su fluidez y en ciertos casos aumentar su capacidad de desulfuración. Los fundentes básicos que se agregan son piedra caliza, dolomita y fluorita. La cantidad de fundente se agrega, algunas veces, de acuerdo al contenido de ceniza del coque (por ejemplo, se considera 2 kg de caliza por cada kg de ceniza), otras veces al horno de cubilote suele agregarse de 20 a 50% de peso del coque o bien del 3 al 6% del peso de la carga metálica, los fundentes se agregan al horno de cubilote simultáneamente con el coque de tal manera que caigan en el centro del horno y no se pongan en contacto innecesariamente, con el revestimiento ácido. La escoria tiene una considerable influencia durante el transcurso de la fusión y sobre la composición y propiedades del hierro obtenido. Otros aspectos importantes de los fundentes es que protegen al metal líquido contra la oxidación por medio de los gases generados dentro del horno de cubilote, facilitan la combustión del coque al disolver su ceniza, desoxidan al metal líquido y neutralizan al azufre y fósforo.

La efectividad de las escorias depende de sus propiedades fisicoquímicas y de su temperatura. Si en la escoria hay una mayor proporción de componentes ácidos, su comportamiento es ácido y si por el contrario predominan componentes básicos, su comportamiento es básico. La basicidad de las escorias del cubilote por lo general se expresa por la relación siguiente:

$$B = \frac{(\%CaO) + (\%Mg)}{(\%SiO_2) + (\%P_2O_5)}$$

Si $B > 1$ la escoria es básica.

Si $B < 1$ la escoria es ácida

Si $B = 1$ la escoria es neutra.

2.5.3 Emisión de los gases.

Desde el punto de vista ambiental, el horno de cubilote es un emisor de gases nocivos. De ahí la importancia de conocer adecuadamente la composición de los gases de escape del horno. Se considera que un horno de cubilote opera correctamente, como proceso de combustión, cuando la composición de los gases de escape, medidos en la puerta de carga del horno, es aproximadamente la siguiente: 15% CO₂ y 9% CO. Lo anterior, sin embargo, debe considerarse como valores teóricos, ya que en la práctica pueden variar dichos contenidos en límites más amplios.

Por ejemplo, para hornos de cubilote de soplo frío que emplean una relación Chatarra/Coque de 10/1, son normales los valores siguientes: 12-15% de CO₂ y 8-12% de CO [4]. En cualquier caso, el contenido de CO₂ en los gases de escape debe mantenerse entre el 50 y el 65% del total. Aunque son grandes variaciones en la relación chatarra/coque, este valor puede descender hasta 33%. La ausencia de llamas en la puerta de carga del horno es uno de los índices que indican una operación normal del mismo. Algunos autores consideran que se pueden predecir fallas en el funcionamiento del horno, mediante la observación del tipo de llama que se tiene en la puerta de carga [4].

2.6 Influencia de los elementos presentes en hierros colados sobre sus propiedades físicas.

Cuando se ha decidido sobre la composición química para cualquier clase dada de hierro colado, es muy importante tomar en cuenta los efectos que sus principales elementos de aleación tienen. Esto se puede resumir como:

Carbono: Es un elemento grafitizante. En todos los hierros colados el contenido de carbono es el más importante de los elementos. Su cantidad total y el estado de su presencia en la estructura ya sea que se encuentre como grafito libre o combinado en forma de carburos, ejerce la mayor influencia sobre las propiedades mecánicas.

Para las aleaciones solamente de hierro y carbono, la composición eutéctica o punto más bajo de solidificación, es la que tiene aproximadamente 4.3% de carbono. Con contenidos de carbono arriba de ese valor las aleaciones son denominadas hipereutécticas y aquellas con contenidos más bajos se denominan hipoeutécticas. Las composiciones hipereutécticas están expuestas a tener una estructura gruesa de grano abierto, grafitos comparativamente grandes, cuando se enfrían lentamente como en los moldes de arena en verde. Por otro lado, las aleaciones hipoeutécticas tienen estructuras más densas y cerradas y un grafito relativamente fino. Las tendencias mencionadas llegan a ser más extremas si la proporción de carbono aumenta en las composiciones hipereutécticas o disminuye en las hipoeutécticas.

El contenido total de carbono también tiene una influencia muy importante sobre las contracciones líquida y sólida. Los hierros colados que contienen menos del 3% son más difíciles de colar, si el carbono se encuentra por debajo de este valor los métodos de colada y alimentación se tienen que acercar más a los utilizados para las piezas moldeadas en acero.

Los hierros colados comerciales no son aleaciones simples de hierro y carbono, sino que invariablemente contienen una cierta proporción de silicio y manganeso, así como de fósforo y azufre. La presencia de estos elementos afecta la solubilidad del carbono. Es sabido que el silicio y el fósforo, cada uno disminuye la cantidad de carbono necesario para formar

la aleación eutéctica en 0.3% para cada 1% de silicio y 1% de fósforo presente.

Por lo tanto, para encontrar el valor de carbono equivalente para cualquier composición, se suman los porcentajes de silicio y fósforo y se divide entre tres. El resultado así encontrado es sumado al porcentaje de carbono. Si esta muestra que es mayor a 4.3, la composición tenderá a proporcionar piezas de grano grueso con grafito grande, pero si es menor a 4.3 la estructura será más compacta, más sana y contiene menos grafito entre menor es el porcentaje respecto al valor eutéctico.

Silicio: Es un elemento grafitizante. Es el elemento que le sigue en importancia al carbono con respecto a la influencia en las propiedades del hierro colado. La presencia de silicio tenderá a excluir al carbono combinado o en solución en el hierro y lo hace en forma de grafito libre. Por lo anterior, el silicio disminuye la dureza, disminuye la resistencia y densidad. Para las mejores propiedades mecánicas con buenas resistencias a la presión y desgaste, las proporciones de silicio y carbono deben ser resueltas en relación entre cada uno de ellos. Esto es, que el silicio debe ser disminuido según se eleva el contenido de carbono y viceversa, de tal manera deben mantener valores del carbono equivalente dentro de los límites deseados.

Manganeso: Es un elemento antigrafitizante. Lo primero que hace es neutralizar el efecto nocivo del azufre para formar el sulfuro de manganeso en lugar de sulfuro de hierro. El sulfuro de hierro es retenido en el metal líquido y depositado alrededor de los límites de grano, volviéndolo frágil en caliente y probablemente con ello producir piezas fracturadas.

El manganeso en exceso con respecto al contenido requerido para su combinación con azufre forma el carburo de manganeso e incrementa la

dureza y la tendencia. Como el azufre es un promotor de carburos más poderoso que el manganeso, el primer efecto de la adición de manganeso, con frecuencia causa el ablandamiento, debido a la eliminación de la dureza causada por el azufre.

En la neutralización de azufre, el manganeso aumenta la fluidez del hierro líquido.

Azufre: Es un elemento antigrafitizante. Este elemento ejerce un efecto opuesto al del silicio tendiendo a evitar la precipitación de carbono grafito libre. Por lo tanto, tiene una influencia marcadamente endurecedora.

Aparte de esto el azufre vuelve viscoso al metal líquido, disminuye la fluidez y provoca el efecto de porosidad superficial debido al atrapamiento de los gases en el molde durante la colada.

Fósforo: La resistencia mecánica aumenta al máximo, aproximadamente con un contenido de 0.35% de fósforo. A contenidos mayores 0.65% aproximadamente las propiedades de la resistencia mecánicas descienden y continúa haciéndolo en tanto el contenido de fósforo aumente.

La dureza Brinell aumenta alrededor de 4 puntos por cada 0.1% de fosforo agregado a un hierro colado.

La resistencia al impacto disminuye con el incremento de contenido de fósforo. En general se puede decir que el fósforo incrementa la resistencia al desgaste.

2.7 Fundamentos de la metalurgia de la fundición con grafito esferoidal.

La fundición con grafito esferoidal se define como una fundición con alto contenido de carbono, en la que el grafito está presente en formas compactas y esferoidales y no en forma de laminillas, siendo la segunda la característica de la fundición gris.

Lo que se sabe acerca de la fundición con grafito esferoidal es que en general se trata de una transformación eutéctica. Esto se puede aclarar en el diagrama de equilibrio hierro-carbono (**Figura 8**), que muestra las transformaciones (ya sea de líquido-sólido o en estado sólido) como funciones de la temperatura y del contenido de carbono.

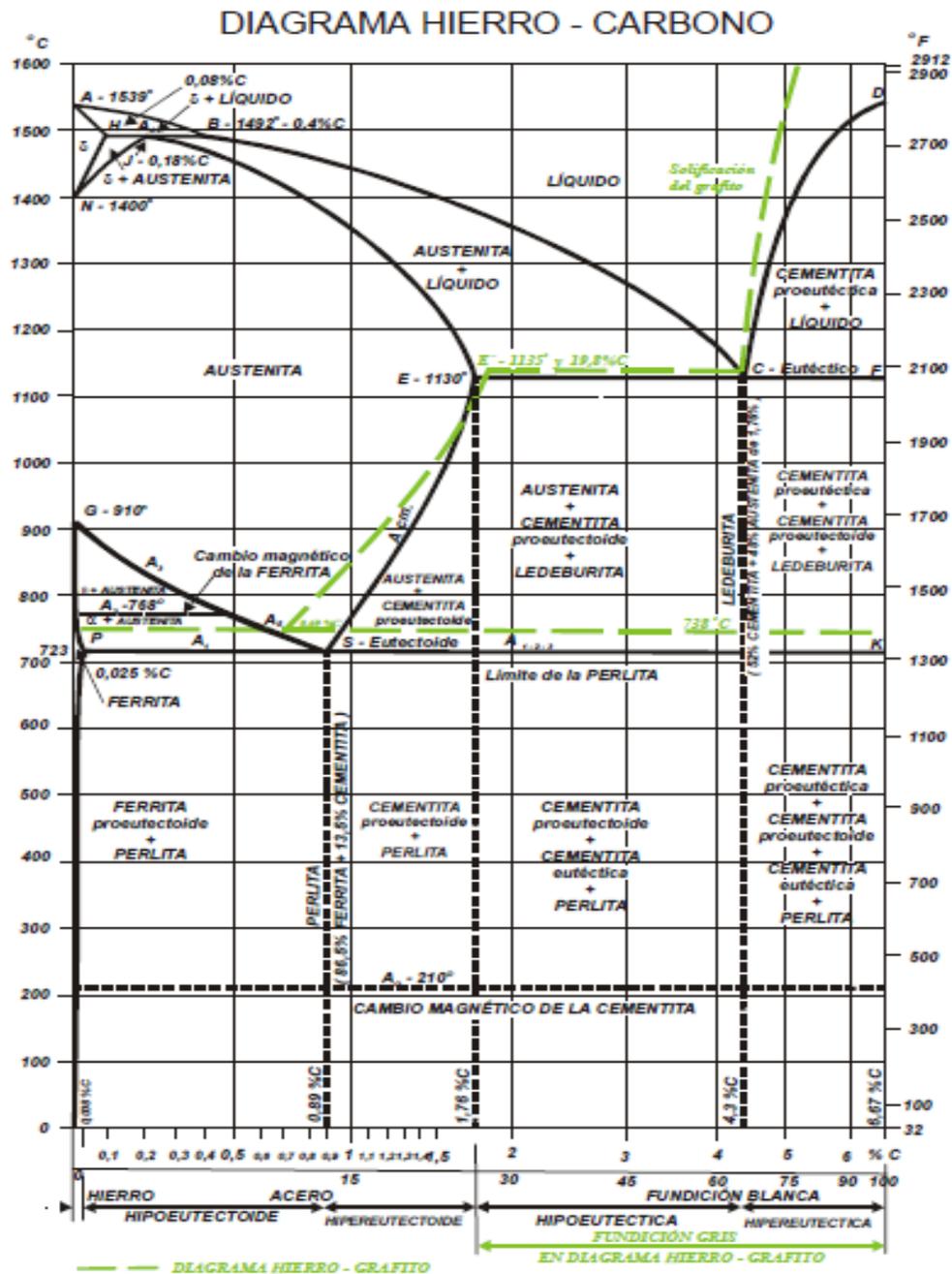


Figura 8. Diagramas de fases Fe-Fe₃C y Fe-Cg.

Lo que dice dicho diagrama es que al comienzo de la solidificación la temperatura disminuye con el aumento del contenido de carbono hasta aproximadamente 1150°C y 4.3% de carbono. El aumento del contenido de carbono aumenta la misma temperatura (la de liquidus). La influencia

del contenido de carbono sobre la terminación de la solidificación se demuestra con la segunda línea del diagrama. Inicialmente, al aumentar el contenido de carbono disminuye esta temperatura (la de solidus). Por encima de un contenido de carbono de 1.75% aproximadamente, sin embargo, no se experimenta alguna otra disminución: la línea se convierte en una horizontal.

Desde el punto de vista práctico, la característica más importante es el solidus horizontal y el encuentro entre las dos líneas en el punto correspondiente a un contenido de carbono de 4.3%. Este punto de unión se le denomina el eutéctico.

De todos los elementos (aparte del carbono) presentes en la fundición con grafito esferoidal, el silicio es el que ejerce la mayor influencia sobre el contenido de carbono del eutéctico. Este efecto de traslación del eutéctico cuando los contenidos de carbono son menores puede explicarse si se tiene en cuenta a que cantidad de carbono equivale el silicio a este respecto. Este silicio se añade al contenido real de carbono y la suma de los dos se denomina "carbono equivalente". Según las mediciones más exactas 1% de silicio reduce el contenido de carbono del eutéctico en un 0.31%. Por consiguiente, el carbono equivalente se expresa de la siguiente forma:

$$\text{C.E.} = \text{CT} (\%) + 0.31 \text{ Si} (\%)$$

En algunos países, en lugar de utilizar el carbono equivalente se usa el "grado de saturación" (S_c), $S_c = \text{C.E.}/4.3$, si S_c es menor que 1, la aleación es hipoeutécticas; si es mayor que 1, la aleación es hipereutécticas.

El silicio altera también la temperatura de solidificación eutéctica, que se presenta a lo largo de un intervalo de temperatura y no isotérmicamente.

Pero en la práctica, en la mayoría de los casos pueden despreciarse estos dos efectos.

Rara vez se da el caso de que el carbono equivalente sea exactamente 4.3%, es decir, exactamente el eutéctico. Aún entonces, es inevitable un ligero subenfriamiento y esto hace que tanto las aleaciones eutécticas como las ligeramente hipereutécticas inicien su solidificación como si fueran hipoeutécticas. Desde un punto de vista práctico, por tanto, el mecanismo de solidificación nunca es eutéctico sino hipo o hipereutéctico.

2.8 Composición química del hierro.

El contenido de azufre debe ser bajo en el hierro a tratar. El magnesio también es un agente desulfurante activo y su primer efecto al ponerse en contacto con el metal, es la eliminación de azufre a contenidos del orden de 0.01%. Hasta que el azufre es disminuido en un límite como ese o cercano, el magnesio ejerce una pequeña influencia sobre la formación del grafito.

Sin considerar el contenido de azufre, la composición preferida del hierro base, está entre los límites siguientes:

- C_{total}: 3.4 a 4.2%.
- Si: 1.8 a 2.5%.
- Mn: 0.4% max.
- P: 0.2% max.

Aun cuando el manganeso y el fósforo no impiden la formación de los nódulos de grafito, si disminuyen la ductilidad de forma considerable y como esta propiedad es una característica importante del hierro nodular,

es esencial mantener el contenido de estos elementos tan bajos como sea posible.

Una de las más grandes dificultades prácticas es conseguir la cantidad requerida de magnesio dentro del metal con el grado necesario de consistencia y seguridad combinada con la libertad suficiente para evitar riesgos. El magnesio ebulle cerca de los 1120°C y cuando es sumergido en el metal líquido a 1400°C, el magnesio metálico se funde y se evapora instantáneamente, escapando con violencia y arrastrando consigo algo del hierro colado.

Un tratamiento adecuado requiere una emulsificación del vapor de magnesio y el metal líquido. Para obtener una emulsión íntima, la liberación del magnesio deberá producirse en un cierto periodo de tiempo y en muchos lugares del metal líquido. Esto puede ser logrado mediante la utilización de aleaciones de magnesio con uno o dos elementos que sean solubles en el hierro o uno especialmente hecho e impregnado como el denominado mag-coque.

El mag-coque es un agente nodulizante que consiste en coque metalúrgico impregnado con magnesio metálico. Contiene aproximadamente 43% en peso de metal y 57% de coque. El coque actúa como portador de magnesio y también regula la reacción, así que cuando el mag-coque se sumerge en el metal líquido la liberación del vapor del magnesio es controlada y continua.

La mejor forma de agregar el mag-coque al metal líquido es mediante la inmersión ya que su baja densidad excluye los métodos de "sándwich" o de "transiego". La eficiencia de la recuperación del magnesio depende de varios factores (temperatura del metal líquido, tamaño de la olla, método utilizado, contenido de azufre en metal, contenido de magnesio residual requerido etc.).

Durante el tratamiento con magnesio gran parte del elemento se pierde por la evaporación. Parte se oxida y reacciona en el metal líquido formando compuestos tanto solubles como insolubles, algunos de los cuales, pasan a la escoria. La reacción principal de formación de la escoria es aquella que produce el sulfuro de magnesio. Solamente el magnesio residual que permanece en el hierro colado es el que provoca la nodularización del grafito.

El magnesio residual en el hierro nodular, se considera de 0.025 a 0.06%. El rendimiento del magnesio a partir de una aleación de silicio con contenido de 7% de Mg y 45% de Si y tomando en cuenta la temperatura de colado se muestra en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Rendimiento de magnesio respecto a la temperatura del metal líquido.

Temperatura de colada	Rendimiento de magnesio
1454°C	35%
1399°C	42.6%
1343°C	65%

2.8.1 Tratamiento de nodularización.

El magnesio es de los elementos conocidos de ser capaces de producir estructura con grafito nodular cuando es agregado al metal líquido, presenta el mayor interés industrial y parece ser capaz de desarrollar las mejores propiedades mecánicas. Una ventaja adicional de un mayor uso del magnesio sobre el cerio, lo constituye el hecho de que los límites permisibles de la composición del hierro base, son un poco más amplios con el magnesio.

El contenido mínimo de magnesio necesario en la pieza, para esferoidizar grafito, puede ser tan bajo como 0.01% o sobrepasar el 0.02%. Si no se

añade más esferoidizante que el magnesio, su concentración no debe ser menor 0.02%. Las adiciones coincidentes de cerio, otras tierras raras o calcio permiten reducir el nivel mínimo de magnesio a 0.01%, pero de este valor no se puede pasar.

Al especificar la cantidad mínima de magnesio necesaria para el metal líquido, surge una dificultad debido a los errores derivados de la técnica de muestreo. Una gran cantidad de inclusiones de MgS en la muestra indicaría un nivel de Mg más alto que el descrito antes, por lo que el análisis no distingue entre Mg y MgS.

Por esta razón, las fundiciones que tratan con fundiciones de base con alto contenido de azufre suelen especificar contenidos altos de magnesio hasta 0.05% como mínimo.

2.8.2 Tratamiento de inoculación.

La palabra inoculación significa en metalurgia proveer al metal líquido de gérmenes o núcleos sobre los que crecen las fases sólidas durante la solidificación. En algunos casos, estos núcleos resultan de añadir partículas a la misma fase que ha de solidificar. Si las partículas no se disuelven completamente antes de que comience la solidificación, proporcionan emplazamientos convenientes para el crecimiento de cristales. En otros casos, pueden ejercer la misma función partículas de material distinto que el que va a solidificar (nucleación heterogénea).

La inoculación en las fundiciones de grafito esferoidal produce núcleos heterogéneos para que precipite el carbono grafito en forma de esferoide.

2.8.2.1 Métodos de inoculación.

Existen en la actualidad varios métodos para llevar a cabo la inoculación, como lo son:

- a) Inoculación temprana.
- b) Inoculación tardía.
- c) Inoculación dentro del molde.

En varias fundidoras dónde se fabrican hierros grises a partir de Hornos de Cubilote, el método tradicional y todavía más sencillo consiste en añadir el inoculante al flujo del metal líquido cuando se está llenando la olla de colada desde la olla de tratamiento.

“Primero se trata y después se inocula”, es lo tradicional y sigue siendo válido. Su razón, sin embargo, se ve ahora en vista de la nueva información que surge a partir de las investigaciones. La eficiencia de la inoculación disminuye drásticamente al aumentar la temperatura a la que se realiza la inoculación. Este descubrimiento dio lugar a la posibilidad de que la “post” inoculación sea más eficaz simplemente porque se hace a una temperatura disminuida por el efecto enfriador del tratamiento.

Inmediatamente después de la adición de la aleación a base de magnesio, el metal líquido debe ser inoculado con un 0.15 a 0.35%. El objetivo de la inoculación es la formación de centros de nucleación para la formación y precipitación de los nódulos de grafito durante la solidificación y de esta manera, mejorar sus propiedades físicas y mecánicas. Para la inoculación se utiliza generalmente ferrosilicio.

El tratamiento de esferoidización y de inoculación son dos procesos cuyos efectos decaen con el tiempo.

2.9 Influencia de los elementos de aleación en el hierro nodular.

El tipo de aleación puede variar sus propiedades físicas fácilmente por la influencia de uno o más elementos, por lo que a continuación se mencionan los más importantes, proporcionando los porcentajes más comunes en la composición química de un hierro nodular:

Carbono: El contenido de carbono más recomendable en el hierro nodular varía entre 3.4 a 3.8%. Tiene muy poca influencia sobre las propiedades mecánicas del hierro nodular ya que no afecta la formación de las microestructuras de la matriz, la cual determina todas las propiedades mecánicas. Esos son los contenidos de carbono final que se recomienda para el hierro nodular que garantizaran una buena fluidez, bajos requerimientos de alimentación y grandes cantidades de nódulos. El contenido inferior de carbono se aplica en hierros para piezas de espesores grandes.

Silicio: Los contenidos más comunes de silicio en el hierro nodular son de 2 a 3%. Sin embargo, algunas veces se hacen necesarios contenidos menores a 2% o bien mayores a 3%. El silicio es un fuerte promotor de la grafitización y de la ferrita. Con muy altos contenidos de silicio el hierro nodular pierde resistencia al impacto.

Manganeso: Es un antigrafitizante y es un fuerte estabilizador de la perlita, por lo que, para obtener una buena ductilidad, en la pieza en bruto, es necesario un contenido de Mn menor a 0.2% para así tener una estructura completamente ferrítica.

Debido a que no es fácil tener bajo contenidos de Mn en el hierro nodular, algunas veces es necesario tratar térmicamente las piezas para obtener la ferrita requerida. En espesores de piezas mayores a 16 mm (5/8 de

pulgada) se puede aceptar contenidos de Mn de 0.5% y aun así obtener una buena estructura ferrítica.

Cuando lo que se requiere es una alta resistencia en lugar de ductilidad, el contenido de Mn debe ser de 0.5 a 0.8% con el objeto de estabilizar la perlita.

Debido a que los contenidos de azufre en el hierro nodular, son muy bajos; el manganeso no se combina con él, como lo hace en el hierro gris común.

Fósforo: Debe estar presente en el porcentaje más bajo posible y deberá ser menor a 0.10%, si se desea tener un hierro nodular con altas propiedades mecánicas especialmente la resistencia, se debe de evitar la formación de esteadita que le imparte fragilidad.

En pieza que van a ser tratadas térmicamente se acepta hasta 0.15% P. no tiene influencia sobre la forma del grafito.

Azufre: El proceso de nodularización, para la obtención del hierro nodular, se facilita si el hierro base contiene muy bajos contenidos de azufre ya que el Mg y Ce tienen alta afinidad por el azufre. Con el objeto de disminuir los costos de operación es necesario llevar a cabo una desulfuración (en caso de que el azufre se encuentre por arriba de 0.03%) antes del tratamiento de nodularización. El contenido final de azufre en un hierro nodular debe ser de 0.009 a 0.012%.

Otros elementos que pueden tener influencia sobre la estructura y propiedades del hierro nodular son los siguientes:

Cromo: Impide la grafitización y promueve la formación de carburos muy estables. Algunas veces se agrega al hierro nodular hasta un 0.4% para

incrementar las resistencias mecánicas. Es un elemento indeseable en el hierro nodular.

Cobre: Fomenta la formación de estructura perlítica ya que impide la formación directa e indirecta de la ferrita. Con contenidos mayores a 1% actúa negativamente sobre el grafito.

Estaño: Es un elemento estabilizador de la perlita. Puede provocar la formación de grafito laminar (0.01 a 0.15%).

Calcio: Es un elemento que puede provocar la formación de carburos. Fomenta la generación de nódulos. Es parcialmente soluble en hierro.

Boro: Fomenta la formación de carburos muy estables (máximo, 0.002%).

Molibdeno: Aumenta la dureza y afina la perlita, en contenidos de 0.50 a 0.75%. Como impureza hasta 0.05%.

Plomo: Fomenta la formación del grafito laminar provocando la degeneración de los nódulos formados (máximo, 0.02%).

Aluminio: Fomenta la formación de grafito vermicular (0.04 a 0.1%).

Zirconio: Hasta 0.10%, ayuda a impedir el crecimiento de los nódulos en piezas con espesores grandes. A contenidos mayores de 0.10%, puede fomentar la formación de grafito vermicular.

Níquel: Favorece la grafitización y forma con la ferrita una solución sólida. En hierros más suaves fomenta la precipitación de la perlita e impide, parcialmente, la ferritización, en contenidos de hasta 0.75%, en los hierros aleados hasta 2.0%.

Oxígeno: Aumenta la necesidad de magnesio en contenidos de hasta 0.005%.

Hidrogeno: Su contenido en exceso genera el defecto de porosidad superficial (pinhole) y estabiliza los carburos en contenidos de 0.003%.

Nitrógeno: Estabiliza la perlita y provoca el defecto de porosidad superficial (pinhole) (0.009%).

Capítulo 3. Desarrollo experimental.

El desarrollo experimental se dividió en varias etapas:

3.1 Diseño y construcción del horno de cubilote.

3.2 Selección de chatarras y balance de carga.

3.3 Operación del horno de cubilote.

3.4 Pruebas de fusión.

A continuación, se describe cada una de las etapas.

3.1 Diseño y construcción del horno de cubilote.

Se diseñó (**Figura 9 a**) y construyó un horno de cubilote a partir de un tubo de acero SAE 1020 bajo carbono con un diámetro interior de 90 cm y espesor de 1 pulgada, a partir de estas dimensiones se realizaron los cálculos para la construcción del horno teniendo en cuenta que el espesor mínimo requerido para el material refractario es de 52 cm.

El horno se diseñó para que fuese de sangrado intermitente, con una capacidad de crisol de 200kg de metal líquido y una velocidad de fusión aproximada de 1000kg/hr, sangrando el crisol del horno en intervalos de 10 a 12 minutos. El horno albergará un máximo de 3 cargas respetando la relación coque-metal (Relación 1: 8) que se requiera para la fusión de la chatarra, así como la cantidad de fundente (3.5% con respecto al peso de la chatarra a introducir) y la temperatura que se desea en el metal líquido.

Etapa 1.

La primera operación que se realizó en la construcción fue la base del horno, la cual consta de 4 soportes cilíndricos de un metro de altura y 4

pulgadas de diámetro colocados en las esquinas de una placa cuadrada de acero con dimensiones de 1 metro de lado y espesor de 1 pulgada, en el centro de la placa. En la parte superior de la base se realizó un corte circular de 50 cm de diámetro, el cual tiene las funciones de compuerta de descarga del horno al final de cada fusión y como entrada para personal de mantenimiento al interior del horno para realizar reparaciones pertinentes del material refractario.

Etapa 2.

El cuerpo del horno se secciono por la mitad para agilizar las maniobras de montaje y traslado del mismo para poder colocarlo y fijado en el lugar designado de operación. En la parte superior del horno se realizó el corte de la compuerta de carga que consta de una abertura de sección cuadrada con dimensiones de 60x60 centímetros; las dos secciones del horno se unen posteriormente con ayuda de soportes soldados en el perímetro exterior del horno a distancias iguales y fijados entre sí con 6 tornillos colocados en los soportes de la carcasa en cada una de las dos secciones del horno.

Una vez colocado el cuerpo del horno a la base este se fijó en su lugar de operación y se procedió a perforar el canal de sangrado y escoriadero, el cual está situado a 30 cm del piso del horno y a 90° del canal de sangrado, realizado lo anterior se procedió a construir la caja de viento y las toberas del horno por separado.

Etapa 3.

La caja de viento fue fabricada con placa de acero con un espesor de 3/8 de pulgada (0.925cm) y tiene un diámetro interior de 109 cm y un diámetro exterior de 131.52 cm con una altura de 23 cm. La caja de viento está separada 10 cm del cuerpo del horno con la finalidad de poder colocar

posteriormente, si así se desea, un sistema de enfriamiento por agua para evitar un sobrecalentamiento en la parte exterior del horno.

La caja está construida en cuatro secciones circulares con un ángulo de 90° y unidas por soldadura de arco, en la cara inferior de la caja se realizaron 4 perforaciones a distancias iguales donde se colocaron posteriormente las toberas.

Etapa 4.

Una vez concluida la fabricación de la caja de viento se procedió a construir las toberas del horno, que en este caso son 4, dichas toberas constan de una sección circular con un diámetro de 4 pulgadas (10.16cm), cada una de las toberas cuenta con una mirilla, la cual se colocó horizontalmente en los codos de las toberas con la finalidad de observar el funcionamiento del horno y poder picar la cama de coque para facilitar la bajada del material y evitar taponamientos en la parte interna del horno. Las toberas se colocaron a distancia iguales en la parte inferior de la caja de viento y se soldaron a la carcasa del horno a una altura de 10 cm arriba del escoriadero, esto con la finalidad de evitar obstrucciones en las toberas a causa de taponamientos por escoria o metal fundido.

Etapa 5.

Posteriormente se colocó la compuerta de descarga en la base del horno que consta de una placa de acero de sección circular con un espesor de 1 pulgada (2.54). Se colocaron los canales de escoria y sangrado; el tubo del ventilador el cual está colocado tangencialmente a la caja de viento para asegurar un buen flujo de aire y evitar pérdidas de presión por fricción, el tubo del ventilador tiene una longitud de 1m de largo, en el otro extremo del tubo se colocó llave de mariposa para poder regular el flujo de aire que viene del ventilador, seguido de la llave de mariposa está

colocado el ventilador el cual está impulsado por un motor de 10hp con una polea de 7 pulgadas de diámetro en la flecha del ventilador y una polea de 4.5 pulgadas en la flecha del ventilador, alcanzando 2460 rpm aproximadamente suficientes para insuflar el aire requerido para la combustión del coque y la fusión de las chatarras cargadas al horno.

Etapa 6.

Finalmente se colocó el refractario del horno que consta de dos capas de tabique refractario para dar un espesor de 20cm de la pared del horno hacia el centro de este (**Figura 9b**), el refractario utilizado es de sección rectangular con dimensiones de 4x2x9 pulgadas (10.16x5.08x22.86cm) y está unido con mortero refractario. Una vez colocado el refractario el espacio en el interior del horno resulto ser de 50cm de diámetro aproximadamente que es la dimensión que se requería para el interior del horno, el piso del horno se cubrió con una capa de arena de 10cm de espesor así como los canales sangrado y escoriado, cabe mencionar que las camas de arena se colocan solo una horas antes de operar el horno y estos son retirados después de cada fusión y se coloca nuevamente antes de realizar la siguiente hornada.

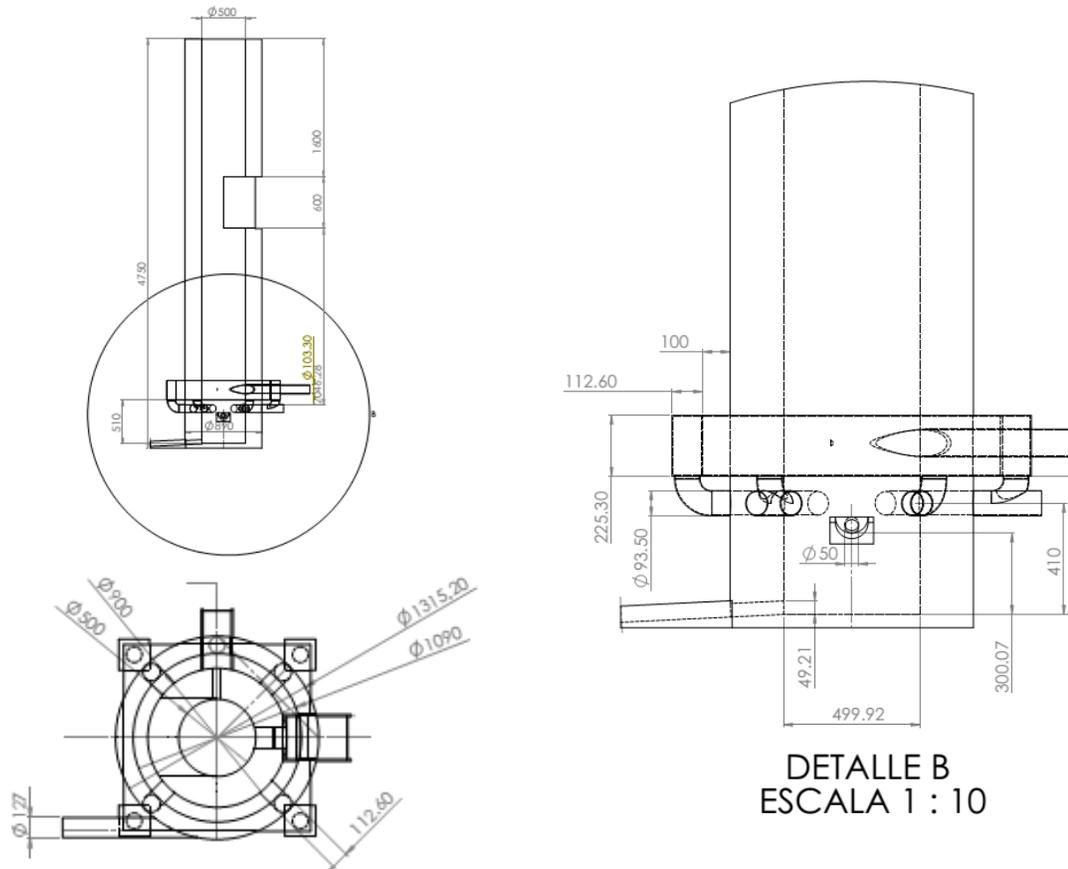


Figura 9 a (arriba) diseño del horno cubilote, b(abajo) Refractivo colocado en el interior del horno.

3.2 Selección de chatarras y pruebas de fusión realizadas en el horno de cubilote.

Selección de chatarras.

En la fusión de un horno cubilote es de suma importancia tener un control en las chatarras que se van a cargar al horno ya que de esto dependerá la calidad del metal líquido obtenido, así como las propiedades físicas y mecánicas para el tipo de pieza que se está fabricando.

La planta cuenta solamente con 4 tipos de chatarra: arrabio, acero estructural, chatarra de hierro automotriz y chatarra de maquinaria textil.

Se procedió con la selección y clasificación de las chatarras automotrices a emplear realizando un muestreo aleatorio, así como del tamaño de la misma. Estas chatarras de hierro colado empleadas fueron: monoblock 1, monoblock 2, monoblock 3, monoblock 4, tambor, disco de freno sólido 1, disco de freno sólido 2, disco de freno ventilado, rotor 1, rotor 2, árbol de levas, múltiple y cigüeñal. A cada una de estas chatarras se les realizó un análisis químico por medio de un espectrómetro de emisión de masas.

Pruebas de fusión.

A continuación, se describen las pruebas de fusión realizadas en el horno de cubilote.

Se hace mención que los moldes de las piezas a fabricar fueron elaborados mediante el proceso de moldeo en verde.

Prueba 1.

La primera prueba fue para determinar los rendimientos por elemento, los cuales son importantes conocer para el cálculo del balance de carga. Estos rendimientos calculados se obtuvieron a partir de la composición química esperada teóricamente y de la composición química que se

obtuvo experimentalmente a la salida del horno de cubilote. Se hace mención que se utilizó exclusivamente chatarra automotriz para la determinación de los rendimientos.

Posteriormente se llevaron a cabo las pruebas para la obtención del hierro nodular grado 65-45-12, las cuales se describen en la Prueba 2 y 3.

Prueba 2.

En la segunda prueba se realizaron tres fusiones (Fusión A, B y C) para la obtención del hierro nodular.

Para el balance de carga se utilizó solamente chatarra automotriz y un porcentaje de arrabio para aumentar el contenido de carbono en el metal base, también se ajustó el contenido de silicio agregando un porcentaje de ferrosilicio a las cargas en el horno.

Las cantidades a emplear de los materiales que se establecieron para la prueba 2 se muestran en la **Tabla 3**.

Tabla 3. *Cantidades representativas de acuerdo a la relación Coque: Chatarra (1: 8) y de la Caliza empleada por carga al horno de cubilote para la prueba 2.*

Cargas al horno de Cubilote	Kilogramos
<i>Chatarra Automotriz</i>	<i>80</i>
<i>Arrabio</i>	<i>40</i>
<i>Coque</i>	<i>15</i>
<i>Caliza</i>	<i>4</i>

Prueba 3.

En la prueba 3 se realizaron cambios en tipos y cantidades de chatarras. Lo anterior para tratar de estar más cerca de la composición química del hierro nodular grado 65-45-12. En la **Tabla 4**, se muestran las cargas introducidas al horno de cubilote.

Tabla 4. Cantidades representativas de acuerdo a la relación Coque: Chatarra (1: 8) y de la Caliza empleada por carga al horno de cubilote para la prueba 3.

Cargas al horno de Cubilote	Kilogramos
Chatarra Automotriz	25
Retorno de hierro nodular	25
Chatarra de hierro nodular	50
Arrabio	20
Coque	15
Caliza	4

3.3 Caracterización metalográfica y ensayo de dureza Brinell.

La caracterización metalográfica y la prueba de dureza Brinell (durómetro modelo HB-3000, indentador de acero de 10mm, carga de 3000kp y un tiempo de 12s) de los hierros colados obtenidos para la prueba 2 se llevó a cabo en una pieza escalonada como la que se muestra en la **Figura 10** y se realizó para cada escalón.

Los cálculos del sistema de colada de la pieza escalonada, se muestran en el **Anexo 1**.

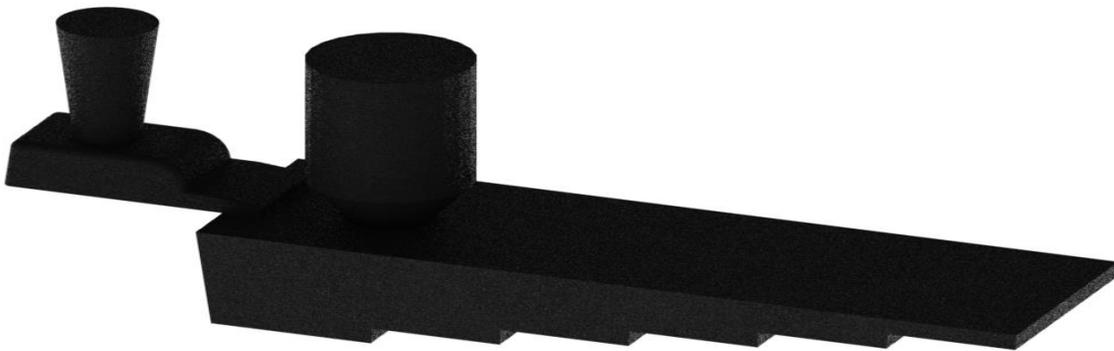


Figura 10. Pieza empleada en la Prueba 1 y 2 para la caracterización microestructural y en la prueba de dureza Brinell.

Se realiza una comparación para la prueba 2 y 3, tomando en cuenta el efecto de la inoculación y la caracterización metalográfica y prueba de dureza Brinell, se llevó a cabo en las piezas que se muestran en la **Figura 11**. Por motivos de confidencialidad de la empresa, no se muestra la placa modelo.



Figura 11. Pieza empleada en la prueba 3 para la caracterización microestructural y en la prueba de dureza Brinell.

3.4 Operación del horno.

Para el encendido del horno primeramente se procede a cargar un poco de coque hasta la altura de las toberas aproximadamente, este se enciende con ayuda de una lanza de gas y aire para avivar la flama, esta operación se realiza hasta que la parte inferior del coque haya encendido por completo, una vez que encendió la cama de coque se retira la lanza de gas y se procede a abrir las mirillas para dejar circular aire dentro del horno y encienda todo el coque cargado. Posteriormente se carga la cama de coque hasta la altura requerida que en este caso es de 36 pulgadas (91.44cm) del piso de arena hacia arriba del horno, y nuevamente se procede a encender el coque cargado, una vez que encendió la cama de coque, se cierran las mirillas y se procede a colocar el canal de sangrado con ayuda de tabique refractario, mortero y arena.

Hecho lo anterior se cierran las mirillas y se procede a cargar la chatarra junto con coque y caliza (120 kg de chatarra, 15kg de coque, 4kg de caliza), se enciende el ventilador del horno para comenzar la fusión de las chatarras, después de 8 a 10 minutos de haber encendido el ventilador, comienzan a caer la primeras gotas de metal fundido, dicho metal líquido aún no tiene la temperatura adecuada por lo que se lingotea para volver a cargar el horno, cuando el metal líquido alcanza una buena temperatura se tapa el canal de sangrado con mortero refractario y se da tiempo para que se deposite metal fundido en el crisol, mientras se hace esta operación se siguen agregando cargas al horno, ya que no se debe dejar que el nivel de la cama de coque descienda, también se debe asegurar que las cargas de chatarra no bajen del nivel de la boca de carga, esto para que los gases de salida de la combustión y fusión del metal precalienten las cargas que se encuentran en la parte superior del horno.

Pasados 10 a 12 minutos de haber sellado el canal de sangrado empieza a caer escoria por el orificio de sangrado, lo cual indica que el crisol está lleno y es necesario sangrar el horno, por lo que se procede a "picar" el tapón de refractario colocado en el canal de sangrado. El metal líquido comienza a fluir y se recolecta en cucharas de retención para trasvasar posteriormente a una olla de tratamiento para realizar la desulfuración y nodularización del metal líquido sangrado del horno.

Capítulo 4. Resultados y análisis.

4.1 Horno cubilote.

Se diseñó y construyó un horno cubilote de sangrado intermitente para la fabricación de hierro nodular de diferentes grados según la norma ASTM A536, dicho horno tiene un diámetro interno de 50cm y diámetro externo de 90cm, con esta medida se realizaron los cálculos para dimensionar el horno, dicho horno tiene una capacidad de 200 kg de metal líquido en el crisol y puede albergar hasta 3 cargas metálicas, los cálculos realizados se presentan a continuación:

- *Diámetro del crisol.*

$$\Phi_{\text{crisol}} = 50\text{cm} \approx 19.685''$$

- *Capacidad del crisol (C_C):*

$$C_C = 0.04261 d^2 h$$

Donde

C_C =capacidad del crisol

d =diámetro interior del horno= 50cm

h = altura del crisol

$$h = \frac{C_C}{0.04261 d^2} = \frac{200\text{Kg}}{0.04261 * 19.685''} = 12.112'' \approx 30.76\text{cm}$$

- *Cantidad de aire necesario para la fusión:*

El aire necesario en la zona de toberas es:

$$\text{aire soplado} = 2 d^2 = 2 * 19.685^2 = 775 \frac{\text{pie}^3}{\text{minuto}} \approx 1316 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$$

Se requiere de una presión de aire de $16 \frac{\text{oz}}{\text{in}^2}$

Teniendo la cantidad de aire necesario para las toberas se calcula la potencia del motor:

$$\begin{aligned} \text{potencia de motor: } 0.00037 * \text{aire soplado} * \text{presion} &= 3.7 \times 10^{-4} * 775 \frac{\text{pie}^3}{\text{min}} * 16 \frac{\text{oz}}{\text{in}^2} \\ &= 4.58 \text{ hp} \approx 5 \text{ hp} \end{aligned}$$

- *Área de toberas (At):*

$$At = 0.165 d^2 = 0.165 * 19.685^2 = 412.5 \text{ cm}^2$$

Una vez teniendo el área total de las toberas, se divide entre el número total de toberas que llevara el horno, que en este caso son 4 toberas.

$$\text{Area de cada tobera} = \frac{412.5 \text{ cm}^2}{4} = 103.125 \text{ cm}^2$$

Posteriormente se calculó el diámetro de cada tobera que se montó en el horno.

Sabiendo que el área de un círculo es: $A = \pi r^2 = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2$

Despejando el diámetro: $d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 * 103.125}{\pi}} = 11.45 \text{ cm} \approx 4.5 \text{ in}$ sin embargo ningún distribuidor cuenta con tubos de esta medida, por lo que se optó por utilizar una tubería con diámetro de 4 pulgadas.

- *Caja de viento:*

Hay varias ecuaciones o formas de dimensionar la caja de viento, una de ellas es partiendo de las dimensiones del tubo del ventilador o a partir de los diámetro internos del cubilote, para este caso las dimensiones de la caja de viento se tomaron considerando las dimensiones del tubo del ventilador que es de 6 pulgadas, y la relación que existe entre la caja de viento y el tubo del ventilador es: altura de la caja de viento = 2 veces el diámetro del tubo del ventilador, ancho de la caja de viento = 1 vez el diámetro del tubo del ventilador.

Por lo que las dimensiones finales de la caja de viento son: ancho de a caja 11cm, altura de a caja 23cm, estas dimensiones se realizaron considerando un tubo de 5 pulgadas, sin embargo, no fue posible colocarlo en el horno ya que no se fabrican tubos de estas dimensiones comercialmente por lo que el tubo que se coloco fue de 6 pulgadas, también se colocó una mariposa para regular el flujo de aire hacia las toberas. Cabe mencionar que la caja de viento se encuentra separada del horno a una distancia de 11cm aproximadamente, esto se hizo pensando que en algún momento se puede implementar un sistema de enfriamiento por agua en la zona de fusión y crisol del horno.

- *Altura de la boca de carga (Bc):*

$$Bc = 2d + 150 = 2 * 50\text{cm} + 150\text{cm} = 250\text{cm}$$

El plano del horno de cubilote con las dimensiones se muestra en la **Figura 12:**

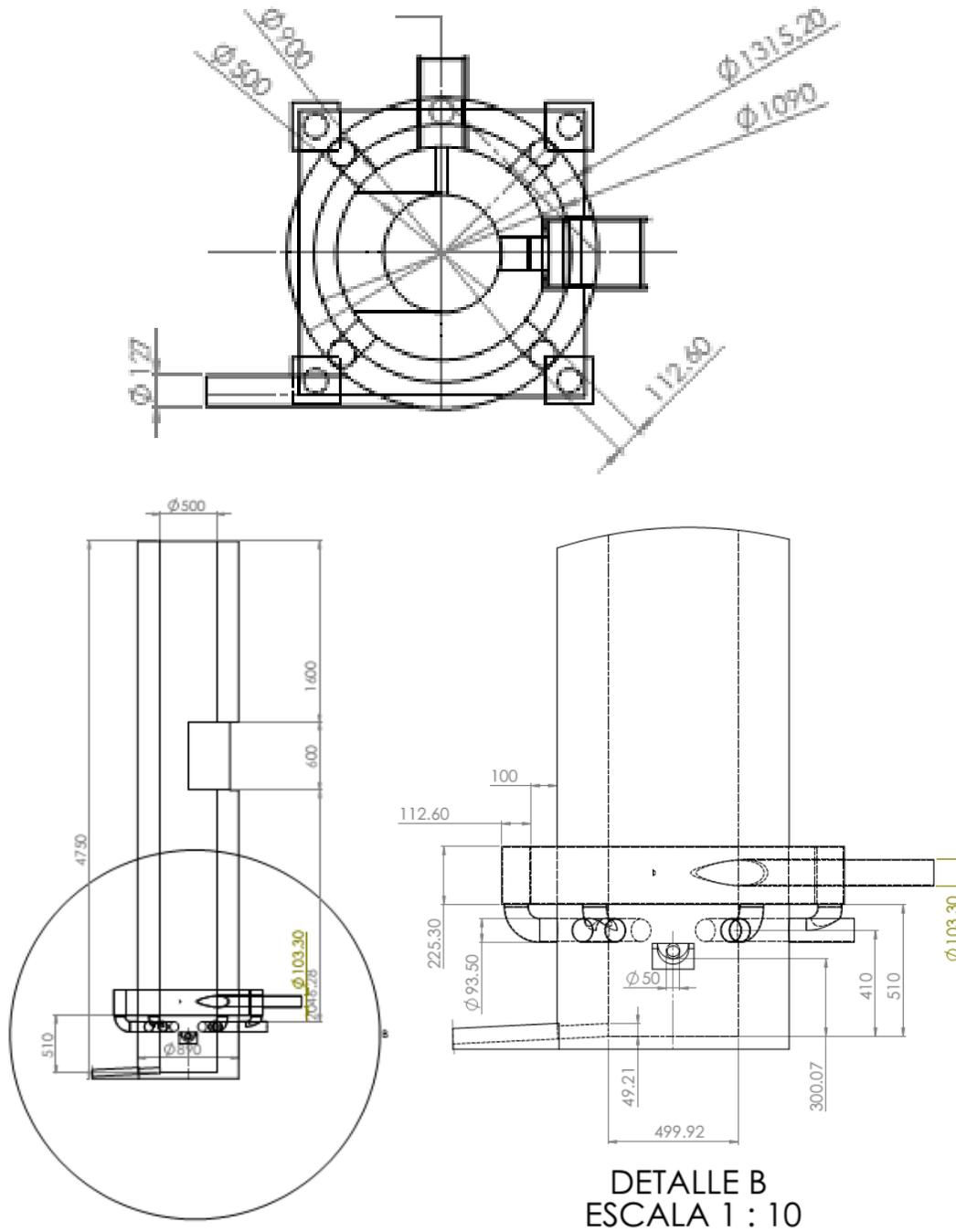


Figura 12. Plano del horno de cubilote.

A continuación, en la **Figura 13** y **Figura 14**, se muestra la construcción de la caja de vientos, zona de toberas y del área inferior del horno.



Figura 13. Construcción de la caja de viento y zona de toberas.

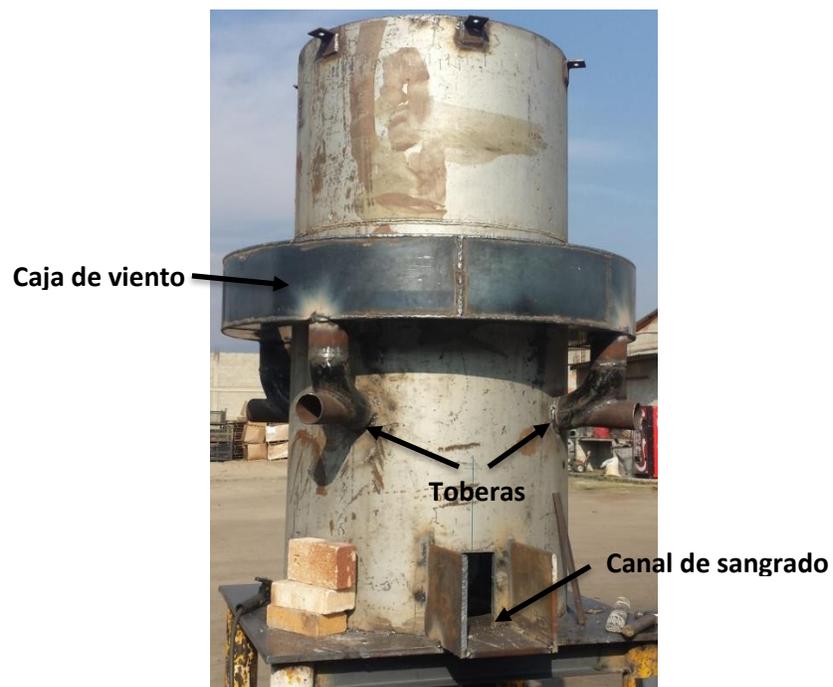


Figura 14. Construcción del área inferior de horno (canal de sangrado).

De los cálculos obtenidos teóricamente, no todos se aplicaron en la construcción del horno debido a las dificultades para la construcción, tal

es el caso de la distancia entre toberas y caja de viento, se recomienda que esta distancia no sea mayor a 4 pulgadas sin embargo los codos utilizados de 4 pulgadas de diámetro miden 18cm de altura lo que hace imposible poder respetar la dimensión antes mencionada, en el caso de la potencia para insuflar aire al horno, se empleó un motor con 10hp (**Figura 15**) y no de 5hp ya que en la planta se cuenta con un motor de esta capacidad y será utilizado para la operación del horno, otra de las limitantes son las dimensiones de tubería, ya que solo se fabrican tubos de dimensiones establecidas por lo que se tiene que utilizar el material con que se cuenta y aproximarle lo más posible a las dimensiones establecidas por el cálculo realizado, finalmente el horno de cubilote se colocó en el espacio asignado para su operación (**Figura 16**).



Figura 15. Motor e impulsor utilizados para insuflar aire en las toberas.



Figura 16. Horno terminado listo para su operación.

Se calculó también la cantidad de las cargas agregadas al horno:

- *Altura de la cama de coque.*

La cantidad de coque que se utiliza está ligada a la presión de aire dentro del cubilote, la cama se fija de acuerdo a una altura y no al peso de coque.

Para un horno de 15 a 19 pulgadas (38.1 a 48.26cm) de diámetro se recomienda utilizar una altura de 36 pulgadas (144cm) en la cama de coque.

La calidad del carbón para la cama debe ser de la mejor con la que se cuenta en la planta y no se debe usar carbón recuperado de las camas anteriores.

- *Cantidad de coque por carga.*

Durante la fusión el carbón que se consume es de la cama, haciendo que la altura de esta disminuya, por lo que es necesario reponer el coque consumido para mantener la altura de la cama constante.

Teóricamente se consume una altura de coque de 6.5 pulgadas (16.51cm) entre carga y carga, ya que se tiene que reponer esta pérdida de coque, se calculó el volumen de 6.5 pulgadas (16.51cm) de coque con respecto al diámetro del horno, sabiendo que el peso específico del coque es 0.00738 kg/in³:

$$\text{volumen de coque por carga} = 0.785 h d^2 = 0.785 * 6.5 * 19.685^2 = 1977.21 \text{ in}^3$$

Para calcular el peso de coque:

$$1977.21 \text{ in}^3 * 0.00738 \frac{\text{kg}}{\text{in}^3} = 14.59 \text{ kg Coque}$$

- *Coque quemado por hora.*

Para una buena combustión se requieren de 300 pies³/minuto para consumir un kg de coque.

$$\text{coque quemado por hora} = \frac{\text{aire por toberas}}{300} * 60 = \frac{775 \frac{\text{pies}^3}{\text{min}}}{300 \frac{\text{pie}^3}{\text{minuto}}} * 60 = 155 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

- *Relación coque: metal.*

En este caso se utilizó una relación de 1:8 respecto al coque y metal por lo que la velocidad de fusión es:

$$\text{velocidad de fusión} = \text{coque por hora} * \text{relación coque: metal} = 155 \frac{\text{kg}}{\text{hr}} * 8 = 1240 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

$$\text{carga metálica} = \text{peso de coque por carga} * \text{relación coque: metal} = 14.59\text{kg} * 8$$

$$\text{carga metálica} = 116.72\text{kg}$$

Para la cantidad de fundente se recomienda utilizar el 3% respecto a la carga metálica por lo que la caliza agregada es:

$$116.72\text{kg} * .03 = 3.5\text{kg de caliza}$$

4.2 Fusión, caracterización microestructural y pruebas de dureza Brinell.

Prueba 1.

Una vez que se tienen controladas las variables de operación del horno de cubilote, se tiene que tomar en cuenta además, las variables que deben de controlarse para asegurar las especificaciones con respecto a las composiciones químicas requeridas de las aleaciones a fabricar, las cuales son: las cargas metálicas (chatarras) y las cargas no metálicas (coque y caliza) que se cargaran al horno y la composición química de las mismas. Es muy importante clasificar también el tamaño de las chatarras que se van a cargar ya que un exceso en las dimensiones de éstas puede

provocar taponamientos en el interior del horno, lo cual se traduce a pérdidas de tiempo en la operación.

Con respecto al control en la composición química de las chatarras cargadas, si bien es difícil tener una composición exacta de las mezclas de chatarras cargadas, se puede realizar un muestreo de manera aleatoria y establecer una composición química promedio de las chatarras con las que se cuenta en la planta, para de esta manera poder establecer el balance de carga de los materiales que se van a cargar en el horno. Una vez que se tiene la composición química promedio de las chatarras y ferroaleaciones se procede a establecer una base de cálculo conocida (para este caso son 120 kg) y se calculan las cantidades necesarias que se requieren de chatarras para una aleación en específico.

Del patio de chatarra se procedió a tomar varias muestras de manera aleatoria de las diferentes chatarras automotrices que le hacen llegar los diferentes proveedores de chatarras con los que cuenta la empresa, **Figura 17.** Posteriormente se les determino la composición química por medio de un espectrómetro de emisión atómica.



Figura 17. Selección de las chatarras para el horno de cubilote.

Las composiciones químicas promedio de las chatarras automotrices cargadas al horno para la **Prueba 1** se presentan en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Composiciones químicas promedio de las chatarras.

	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni	%Cu	%Ti
<i>Monoblock 1</i>	3.564	2.172	0.892	0.031	0.180	0.254	0.050	0.028	0.795	0.012
<i>Monoblock 2</i>	3.177	2.156	1.100	0.032	0.064	0.239	0.050	0.029	0.079	0.036
<i>Monoblock 3</i>	3.396	2.462	0.802	0.026	0.180	0.330	0.050	0.024	0.082	0.012
<i>Monoblock 4</i>	3.372	2.231	0.713	0.030	0.111	0.372	0.050	0.010	0.371	0.019
<i>Tambor</i>	3.756	1.640	0.516	0.114	0.100	0.165	0.050	0.076	0.220	0.013
<i>Disco de Freno Sólido 1</i>	4.253	2.359	0.429	0.045	0.179	0.010	0.050	0.010	0.010	0.014
<i>Disco de Freno Sólido 2</i>	3.476	1.981	0.765	0.012	0.033	0.241	0.050	0.010	0.123	0.011
<i>Disco de Freno Ventilado</i>	3.833	1.879	0.826	0.074	0.180	0.165	0.050	0.010	0.207	0.022
<i>Rotor</i>	3.590	2.910	0.492	0.066	0.180	0.222	0.050	0.069	0.187	0.014
<i>Rotor</i>	3.536	1.842	0.670	0.084	0.103	0.068	0.050	0.010	0.045	0.018
<i>Árbol de levas</i>	3.161	2.364	0.613	0.071	0.013	1.200	0.423	0.028	0.531	0.008
<i>Múltiple</i>	3.440	2.821	0.147	0.025	0.002	0.020	0.050	0.028	0.033	0.016
<i>Cigüeñal</i>	4.800	2.866	0.370	0.010	0.020	0.055	0.486	0.027	0.041	0.010
promedio	3.642	2.223	0.632	0.059	0.115	0.318	0.112	0.023	0.184	0.014

Se llevó a cabo una primera fusión utilizando chatarra automotriz únicamente, esto con la finalidad de calcular y obtener los rendimientos de los elementos presentes en el metal líquido y así lograr establecer un balance de carga para obtener la composición química requerida. Para

esto se prepararon cargas de 120 kg de chatarra automotriz y a cada carga se le agregó 15 kg de coque y 4 kg de piedra caliza.

Durante la fusión se tomaron muestras de metal líquido cada 45 minutos para su posterior análisis químico. Con la composición química de entrada de la chatarra (Teórica) y la composición química a la salida del horno (Experimental), es posible calcular un rendimiento aproximado de los elementos contenidos en el metal líquido, se tomaron 3 muestras durante la fusión, las composiciones químicas obtenidas se presentan en la **Tabla 6**.

Tabla 6. Composición química obtenida.

# de muestra	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni	%Cu	%Ti	%Mg	%CE
1	3.389	1.913	0.533	0.064	0.094	0.214	0.050	0.061	0.345	0.012	<0.005	4.048
2	3.393	1.951	0.534	0.088	0.107	0.237	0.050	0.098	0.290	0.016	<0.005	4.073
3	3.482	1.936	0.558	0.079	0.108	0.244	0.050	0.068	0.292	0.017	<0.005	4.154
Prom.	3.421	1.933	0.542	0.077	0.103	0.232	0.050	0.076	0.309	0.015	<0.005	4.091

Además, para cada carga se incorporó 1 kg de FeSi. Se hace referencia que el % de silicio que aporta el FeSi es de 0.318, por lo que el rendimiento se calculó con un %Si experimental de 1.614 y no del 1.933.

A partir de la **Prueba 1**, se obtuvieron varios parámetros, como la velocidad de fusión el tiempo de sangrado del horno, tiempo entre carga y carga, además de poder establecer los rendimientos de los elementos contenidos en el metal líquido, dichos rendimientos se muestran en la **Tabla 7**.

Tabla 7. Rendimientos de los elementos contenido en el metal líquido.

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Ti
(%) η	93.9	72.0	97.0	100	100	90.2	44.5	100	70.0	96.6

Prueba 2.

Una vez obtenidos los resultados de la **Prueba 1**, se llevó a cabo un balance de carga para establecer una composición química aproximada en el metal base para fabricar un hierro nodular grado 65-45-12. En este balance de carga se emplearon como chatarras el arrabio y chatarra automotriz, esto se hizo con dos fines, primero para incrementar el contenido de carbono en el metal líquido y segundo para disminuir el contenido de manganeso, para asegurar una microestructura mayoritariamente ferrítica.

Para calcular las cargas de chatarra que se agregaran al horno, se tomó la relación coque: metal, 1:8, por lo que la cantidad de carga metálica agregada es de 120kg, ya que se requiere obtener un metal base con un alto contenido de carbono, arriba de 3.5% para tratar de obtener la composición química para un hierro nodular cercano al grado 65-45-12.

Para el cálculo del balance de carga se emplearon los rendimientos obtenidos de la **Prueba 1** y la composición química promedio de las chatarras **Tabla 8**.

Tabla 8. Composición química de las chatarras utilizadas en la fusión, 1) Ch1: Composición química de chatarra automotriz, 80 kg. 2) Ch2: Composición química promedio de arrabio. 40 kg.

Chatarras	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni	%Cu	%Ti
Ch1	3.643	2.283	0.641	0.048	0.103	0.257	0.112	0.028	0.210	0.016
Ch2	4.000	1.355	0.149	0.07	0.169	0.052	0.050	0.010	0.119	0.044

Balance de carga:

Antes de comenzar con el balance se calcula la cantidad de FeSiMg a emplear. Se utiliza la hoja técnica del FeSiMg (6.42% Mg, 45% Si). La cantidad de metal tratado es de 60 kg y la eficiencia que se emplea con

respecto a la recuperación del Magnesio es del 35%. La eficiencia del método que se empleó, se determinó con pruebas realizadas anteriormente con fusiones realizadas en otro horno de cubilote con el que cuenta la empresa.

- Cálculo de la cantidad de FeSiMg.

Se empleó la **Ecuación 1**, como inicio del cálculo:

$$\%Mg_{adicionado} = \frac{\%Mg_{deseado}}{\%Mg_{recuperado} * 0.01} + \%S_{metal\ base} \quad \textbf{Ecuación 1}$$

Sustituyendo los valores conocidos en la **Ecuación 1**, se tiene:

$$\%Mg_{adicionado} = \frac{0.04}{35 * 0.01} + 0.02 = 0.134$$

A continuación, se calcula el %FeSiMg:

$$\%FeSiMg = 0.134\%Mg_{adicionado} * \left(\frac{100\%}{6.42\%Mg\ en\ FeSiMg} \right) = 2.087$$

Por último, se calculan los kilogramos de FeSiMg:

$$kgFeSiMg = 60kg * \left(\frac{2.087\%FeSiMg}{100\%} \right) = 1.252$$

Por lo tanto, la cantidad de FeSiMg agregado a la olla de tratamiento fue de 1.252 kg.

Como ya se obtuvo la cantidad de FeSiMg, se calcula a continuación el % de silicio que aportará el FeSiMg:

Primero se calcula la cantidad (kg) de Si aportado por el FeSiMg:

$$KgSi\ en\ FeSiMg = 1.252kg * \left(\frac{45\%Si\ en\ FeSiMg}{100\%} \right) = 0.563$$

Finalmente se calcula el %Si aportado por el FeSiMg:

$$\%Si_{Aportado\ por\ FeSiMg} = 0.563\ kgSi_{Aportados\ por\ FeSiMg} * \left(\frac{100\%}{60\ kg_{metal\ tratado}} \right) = 0.93$$

- Cálculo de la cantidad de inoculante.

El cálculo de la cantidad de inoculante se realizó mediante la siguiente fórmula.

$$Kg\ FeSi = \frac{kg\ de\ metal\ demandado\ por\ molde * \frac{\% del\ Nivel\ de\ inoculación}{100\%}}{\frac{\%Si\ en\ el\ FeSi}{100\%}}$$

Considerando una inoculación tardía con un nivel de inoculación de 0.2% base Silicio y que la cantidad de metal demandado por molde es de 11.117 kg, se tiene:

$$Kg\ FeSi = \frac{11.117\ kg * \frac{0.2\%}{100\%}}{\frac{76.5\%}{100\%}} = 0.029$$

Inicio del balance de carga.

La composición química promedio requerida se muestra en la **Tabla 9**.

Tabla 9. Composición química promedio requerida del hierro nodular.

	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr
CQ req.	3.7	2.65	0.4	0.05	0.02	0.1

- *Cantidad de elementos requeridos: Para el caso del silicio se resta el % de silicio aportado por la inoculación y la nodularización.*

$$C = \frac{120 * \left(\frac{3.7}{100} \right)}{\frac{93.9}{100}} = 4.727kg.$$

$$Si = \frac{120 * \left(\frac{2.65}{100} - \frac{0.2}{100} - \frac{0.93}{100} \right)}{\frac{72}{100}} = 2.533kg.$$

$$Mn = \frac{120 * \left(\frac{0.4}{100} \right)}{\frac{97}{100}} = 0.494kg.$$

$$P = \frac{120 * \left(\frac{0.05}{100} \right)}{\frac{100}{100}} = 0.06kg.$$

$$S = \frac{120 * \left(\frac{0.02}{100}\right)}{\frac{100}{100}} = 0.024kg.$$

$$Cr = \frac{120 * \left(\frac{0.1}{100}\right)}{\frac{90.17}{100}} = 3.755kg.$$

- *Cálculo de la cantidad aportada por elemento en las materias primas prefijadas, chatarra automotriz 80kg, arrabio 40kg.*

Ch1 (Chatarra automotriz):

$$C = 80\left(\frac{3.643}{100}\right) = 3.059kg$$

$$Si = 80\left(\frac{2.283}{100}\right) = 1.826kg$$

$$Mn = 80\left(\frac{0.641}{100}\right) = 0.512kg$$

$$P = 80\left(\frac{0.048}{100}\right) = 0.038kg$$

$$S = 80\left(\frac{0.103}{100}\right) = 0.082kg$$

Ch2 (Arrabio):

$$C = 40\left(\frac{4.0}{100}\right) = 1.44kg$$

$$Si = 40\left(\frac{1.355}{100}\right) = 0.542kg$$

$$Mn = 40\left(\frac{0.149}{100}\right) = 0.059kg$$

$$P = 40\left(\frac{0.070}{100}\right) = 0.028kg$$

$$S = 40\left(\frac{0.169}{100}\right) = 0.067kg$$

- Ajuste de carga por elemento:

Carbono:

Kg C requerido = Kg de C Aportado Ch1 + Kg de C Aportado por Ch2

$$4.727Kg = 3.059Kg + 1.440Kg$$

4.727Kg = 4.499Kg, lo cual representa un %C de 3.7, por lo tanto, no se ajusta el carbono.

Silicio:

Kg Si requerido = Kg de Si Aportado Ch1 + Kg de Si Aportado por Ch2

$$2.533Kg = 1.826Kg + 0.542Kg + FeSi \left(\frac{76.5\%Si \text{ en } FeSi}{100\%} \right)$$

$$2.533Kg = 2.368Kg + FeSi(0.765)$$

$$\left(\frac{2.533kg - 2.368kg}{0.765} \right) = FeSi = 0.215kg$$

Manganeso:

Kg Mn requerido = Kg de Mn Aportado Ch1 + Kg de Mn Aportado por Ch2

$$0.494Kg = 0.512Kg + 0.059Kg$$

0.494Kg = 0.571Kg, el aporte de la cantidad de las chatarras se encuentra por encima de la cantidad requerida. Los 0.571 kg aportados por las chatarras representan un %Mn de 0.475. Para este caso no se requirió utilizar FeMn.

Azufre:

Kg S requerido = Kg de S Aportado Ch1 + Kg de S Aportado por Ch2

$$0.024Kg = 0.082Kg + 0.067Kg$$

0.024Kg = 0.149Kg, el aporte de la cantidad de azufre en las chatarras se encuentra por encima de la cantidad requerida. Los 0.149 kg aportados por las chatarras representan un %S de 0.124. De acuerdo con las experiencias de la empresa, se llevó a cabo una desulfuración con carbonato de sodio (Na₂CO₃).

Fósforo:

Kg P requerido = Kg de P Aportado Ch1 + Kg de P Aportado por Ch2

0.060Kg = 0.038Kg + 0.028Kg

0.060Kg = 0.066Kg, el aporte de la cantidad de fósforo en las chatarras se encuentra ligeramente por encima de la cantidad requerida. Los 0.066 kg aportados por las chatarras representan un %P de 0.055.

Se agregó 0.5 kg de FeSi (74-79%de Si) en cada carga al horno ya que se requiere un contenido de silicio en el horno aproximadamente de 1.6%, ya que con el aporte del %Si de la inoculación y nodularización (0.2% + 0.93% = 1.13% Si) para tener un porcentaje de silicio en pieza de aproximadamente de 2.6 a 2.7. Además, se agregaron 600 gramos de Na₂CO₃ para desulfurar el metal líquido antes de realizar el tratamiento de nodularización con el fin de evitar que el magnesio reaccione con el azufre y forme el MgS impidiendo la formación del carbono grafito esferoidal. Esta cantidad de carbonato de sodio que se emplea para desulfurar reduce el azufre aproximadamente 0.1%.

4.2.1 Tratamientos al metal líquido.

Antes del sangrado del horno es necesario preparar la olla de tratamiento para realizar la desulfuración, la cual consiste en la adición de carbonato de sodio (Na₂CO₃) que al entrar en contacto con el metal líquido se descompone en Na₂O y CO₂, el óxido de sodio liberado es el agente activo que entra en las reacciones de desulfuración (2Na₂O + 2FeS = 2Na₂S + 2FeO); posteriormente se realiza la nodularización del metal base, primeramente la olla de tratamiento tipo sandwich se recubre con una capa de material refractario la cual se deja secar por unas horas, una vez seco el material refractario de la olla de tratamiento, se precalienta hasta que el refractario tome un color rojo cereza (900 a 1100°C), lo cual indica

que está a la temperatura apropiada para poder realizar el tratamiento al metal líquido, una vez precalentada la olla se coloca en el fondo de esta, una ferroaleación de FeSiMg y se recubre con arena Shell para evitar que la aleación entre en contacto con el metal líquido. Posteriormente colocada la capa de arena Shell se vierte una cantidad de carbonato de sodio en polvo el cual cumple con la función de desulfurar al metal base (**Figura 18**), realizado lo anterior se procede a verter el metal líquido en la olla de tratamiento, al entrar en contacto con el carbonato de sodio se lleva a cabo una reacción violenta la cual desprende gases causados por la reacción, finalmente acabada la reacción de desulfuración, se procede a romper la capa de arena Shell que recubre la aleación de magnesio, cuando el metal líquido entra en contacto con la aleación se lleva a cabo una reacción muy violenta que proyecta metal líquido y gases productos de la reacción, dicha reacción tarda pocos segundos, acabada la reacción de nodularización es necesario limpiar el metal líquido, esto se realiza agregando un escorificante en forma de polvo, cuando éste entra en contacto con el metal líquido, reacciona atrapando la escoria formada por las reacciones y es retirado de la olla de tratamiento, a continuación, se toma una pequeña muestra del metal líquido para fabricar dos probetas, una en forma de cuña y por medio del sonido que esta produce al solidificarla y golpearla contra el piso se puede asegurar si se formó el hierro nodular o no y proceder verterlo en los moldes con su respectiva inoculación tardía, y la otra probeta en forma de moneda es empleada para analizar la composición química final del hierro colado obtenido.

Los tratamientos al metal base son muy importantes, por lo que se debe tener un buen control de las reacciones además de establecer las cantidades necesarias de ferroaleaciones y carbonatos para poder asegurar que se modificara la morfología del grafito libre contenido en el metal base después de la solidificación, para de esta manera asegurar

que se obtendrá un hierro nodular con las propiedades físicas y mecánicas requeridas.

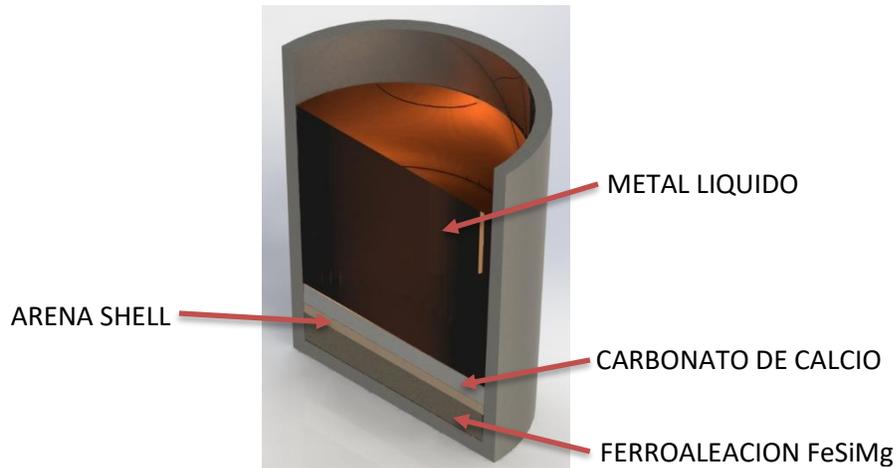


Figura 18. Distribución de componentes en la olla de tratamiento

Para la **Prueba 2**, se realizaron 3 fusiones (A, B y C) en diferentes días con las mismas condiciones estipuladas anteriormente. Los resultados de los análisis químicos finales y preliminares se presentan en la **Tabla 10**.

Tabla 10. Composición química de las fusiones obtenidas en el horno de cubilote.

Fusión		%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni	%Cu	%Ti	%Mg	%CE
	COMPOSICIÓN QUÍMICA REQUERIDA	3.70	2.65	0.40	0.05	0.02	0.10					0.04	4.60
	METAL BASE ESPERADO	3.70	1.61	0.47	0.055	0.024	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.2	0.02	-----	4.19
	COMPOSICIÓN QUÍMICA PRELIMINAR DE LA FUSIÓN A.	3.78	1.26	0.52	0.07	0.07	0.15	0.05	0.04	0.17	0.01	-----	4.22
A	COMPOSICIÓN QUÍMICA FINAL	3.59	2.08	0.51	0.06	0.02	0.16	0.05	0.03	0.17	0.01	0.04	4.30
	COMPOSICIÓN QUÍMICA PRELIMINAR DE LA FUSIÓN B.	3.24	1.66	0.82	0.15	0.09	0.10	0.05	0.05	0.18	0.02	-----	4.18
B	COMPOSICIÓN QUÍMICA FINAL	3.27	2.95	0.80	0.06	0.01	0.15	0.05	0.08	0.25	0.02	0.04	4.27
	COMPOSICIÓN QUÍMICA PRELIMINAR DE LA FUSIÓN C.	3.73	1.59	0.46	0.09	0.07	0.16	0.05	0.03	0.20	0.02	-----	4.29
C	COMPOSICIÓN QUÍMICA FINAL	3.60	2.48	0.45	0.08	0.01	0.16	0.05	0.03	0.22	0.02	0.05	4.45

Como se puede observar en los resultados de la **Tabla 10**, en las tres fusiones realizadas, el %Mg residual obtenido prácticamente es al establecido al inicio (0.04%), con esto se confirma que la eficiencia en la recuperación del magnesio para este método de fabricación es la correcta (Eficiencia del 35%). De acuerdo al %CE, dos de los hierros nodulares (fusión A y C) son de tipo hipereutético, de acuerdo a la literatura, la mayoría de los hierros nodulares que se fabrican son de tipo hipereutético. Los porcentajes de S y P están dentro de la composición química requerida, por lo que, no existirá presencia de MnS y de esteadita en la matriz.

Caracterización microestructural y prueba de dureza Brinell para la Prueba 2.

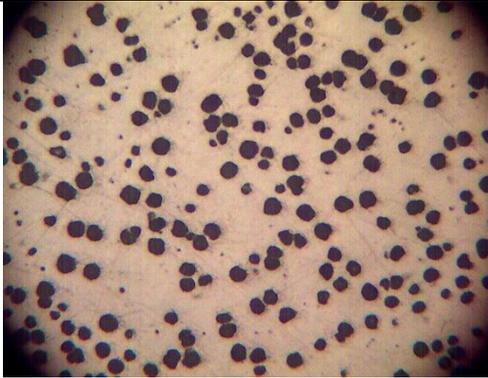
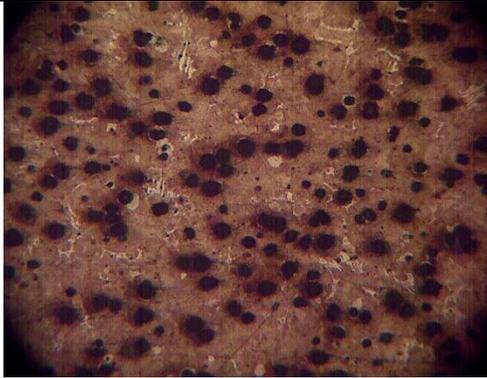
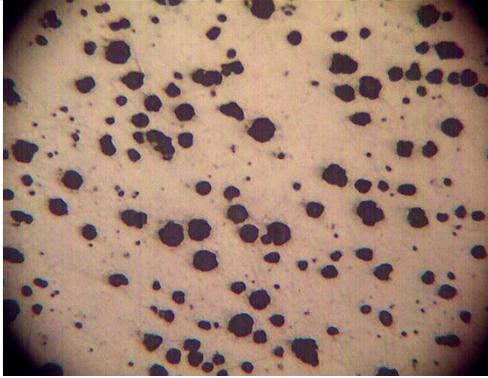
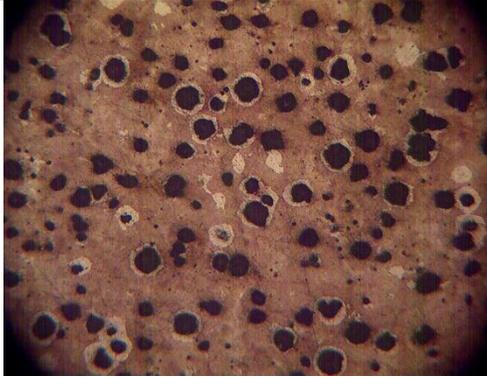
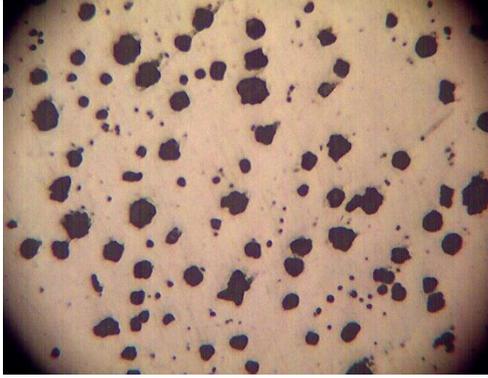
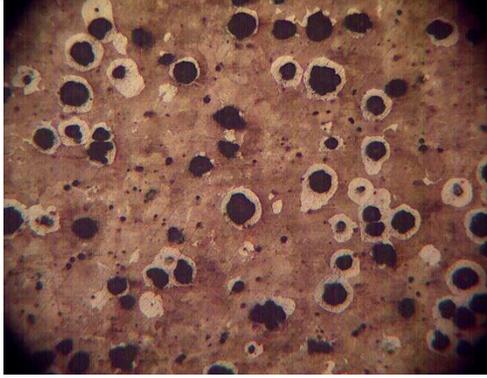
Con la pieza escalonada se analizó la influencia del espesor de la sección y la tendencia al endurecimiento. En la **Figura 18** se muestra el seccionamiento de la pieza.

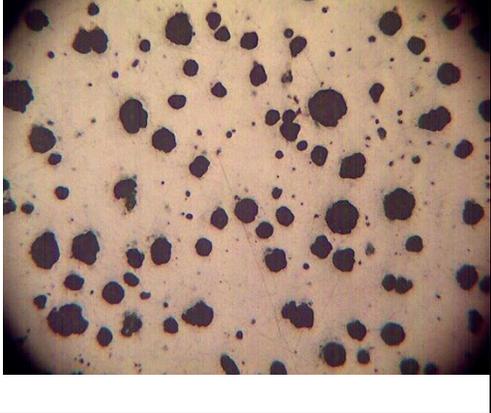
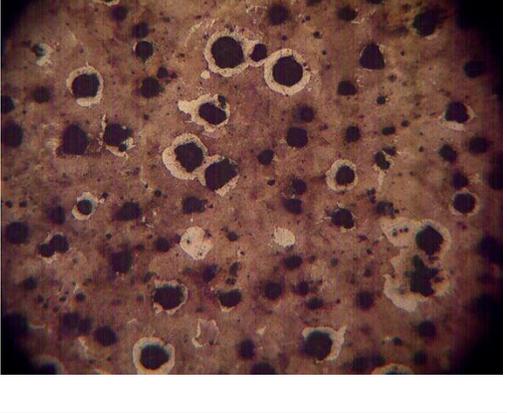
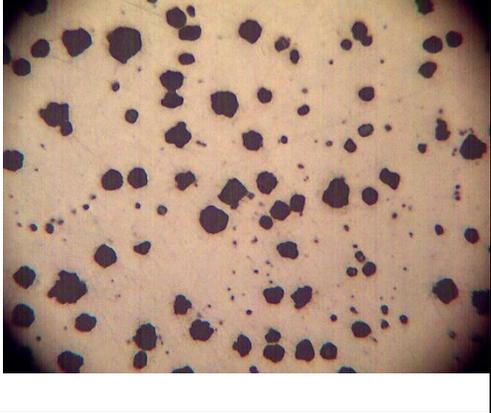
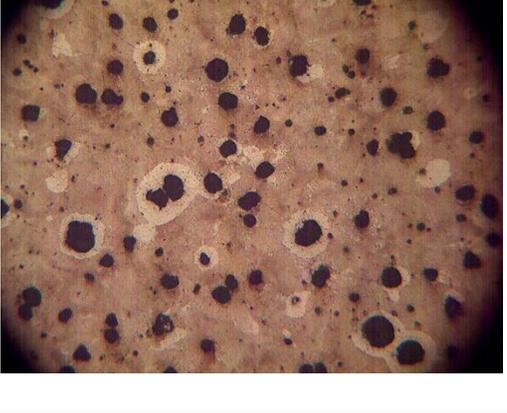
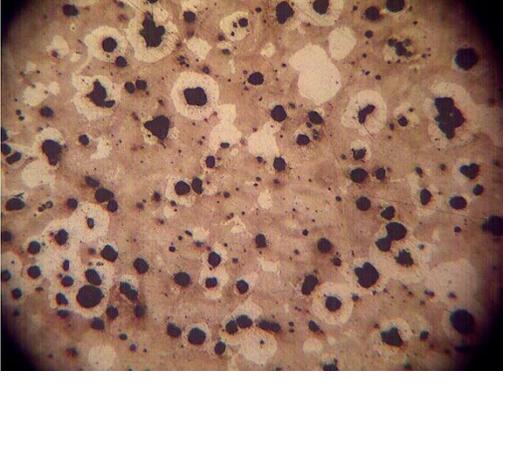


Figura 19. Pieza de hierro nodular seccionada.

La caracterización microestructural y la prueba de dureza se llevó a cabo en la pieza escalonada obtenida de la fusión B, ya que esta composición química presenta el %Si más elevado, los resultados se muestran en la **Tabla 11**.

Tabla 11. Caracterización de hierro nodular obtenido.

SECCIÓN (mm)	SIN ATAQUE 100X	ATAQUE NITAL 100X	OBSERVACIONES												
6.6			HB:277. %Ferrita:0. %Perlita:100. %Carburos:15. % de nodularidad: 95 Densidad:300 Tamaño 7 Composición Química: <table border="1"> <tr><td>%C</td><td>3.24</td></tr> <tr><td>%Si</td><td>2.950</td></tr> <tr><td>%Mn</td><td>0.80</td></tr> <tr><td>%P</td><td>0.06</td></tr> <tr><td>%S</td><td>0.01</td></tr> <tr><td>%Mg</td><td>0.04</td></tr> </table>	%C	3.24	%Si	2.950	%Mn	0.80	%P	0.06	%S	0.01	%Mg	0.04
%C	3.24														
%Si	2.950														
%Mn	0.80														
%P	0.06														
%S	0.01														
%Mg	0.04														
12.5			HB:255 %Ferrita:5 %Perlita:95 %Carburos: 0 % de nodularidad: 90. Densidad:250 Tamaño 5,6 Composición Química: <table border="1"> <tr><td>%C</td><td>3.24</td></tr> <tr><td>%Si</td><td>2.950</td></tr> <tr><td>%Mn</td><td>0.80</td></tr> <tr><td>%P</td><td>0.06</td></tr> <tr><td>%S</td><td>0.01</td></tr> <tr><td>%Mg</td><td>0.04</td></tr> </table>	%C	3.24	%Si	2.950	%Mn	0.80	%P	0.06	%S	0.01	%Mg	0.04
%C	3.24														
%Si	2.950														
%Mn	0.80														
%P	0.06														
%S	0.01														
%Mg	0.04														
19			HB:255 %Ferrita:10 %Perlita:90 %Carburos: 0 % de nodularidad: 90. Densidad:250 Tamaño 5,6 Composición Química: <table border="1"> <tr><td>%C</td><td>3.24</td></tr> <tr><td>%Si</td><td>2.950</td></tr> <tr><td>%Mn</td><td>0.80</td></tr> <tr><td>%P</td><td>0.06</td></tr> <tr><td>%S</td><td>0.01</td></tr> <tr><td>%Mg</td><td>0.04</td></tr> </table>	%C	3.24	%Si	2.950	%Mn	0.80	%P	0.06	%S	0.01	%Mg	0.04
%C	3.24														
%Si	2.950														
%Mn	0.80														
%P	0.06														
%S	0.01														
%Mg	0.04														

25.45			HB:241 %Ferrita:15 %Perlita:85 %Carburos: 0 % de nodularidad: 90 Densidad de nódulos: 250 Tamaño 5,6 Composición Química: <table border="1" data-bbox="1239 422 1534 604"> <tbody> <tr><td>%C</td><td>3.24</td></tr> <tr><td>%Si</td><td>2.950</td></tr> <tr><td>%Mn</td><td>0.80</td></tr> <tr><td>%P</td><td>0.06</td></tr> <tr><td>%S</td><td>0.01</td></tr> <tr><td>%Mg</td><td>0.04</td></tr> </tbody> </table>	%C	3.24	%Si	2.950	%Mn	0.80	%P	0.06	%S	0.01	%Mg	0.04
%C	3.24														
%Si	2.950														
%Mn	0.80														
%P	0.06														
%S	0.01														
%Mg	0.04														
32.2			HB:241 %Ferrita:15 %Perlita:85 %Carburos: 0 % de nodularidad: 85 Densidad:250 Tamaño 5,6 Composición Química: <table border="1" data-bbox="1239 842 1534 1024"> <tbody> <tr><td>%C</td><td>3.24</td></tr> <tr><td>%Si</td><td>2.950</td></tr> <tr><td>%Mn</td><td>0.80</td></tr> <tr><td>%P</td><td>0.06</td></tr> <tr><td>%S</td><td>0.01</td></tr> <tr><td>%Mg</td><td>0.04</td></tr> </tbody> </table>	%C	3.24	%Si	2.950	%Mn	0.80	%P	0.06	%S	0.01	%Mg	0.04
%C	3.24														
%Si	2.950														
%Mn	0.80														
%P	0.06														
%S	0.01														
%Mg	0.04														
38.85			HB:241 %Ferrita:25 %Perlita:75 %Carburos: 0 % de nodularidad: 80. Densidad de nódulos: $250 \frac{nod}{mm^2}$ Tamaño 5 Composición Química: <table border="1" data-bbox="1239 1325 1534 1501"> <tbody> <tr><td>%C</td><td>3.24</td></tr> <tr><td>%Si</td><td>2.950</td></tr> <tr><td>%Mn</td><td>0.80</td></tr> <tr><td>%P</td><td>0.06</td></tr> <tr><td>%S</td><td>0.01</td></tr> <tr><td>%Mg</td><td>0.04</td></tr> </tbody> </table>	%C	3.24	%Si	2.950	%Mn	0.80	%P	0.06	%S	0.01	%Mg	0.04
%C	3.24														
%Si	2.950														
%Mn	0.80														
%P	0.06														
%S	0.01														
%Mg	0.04														

Si se observa la composición química obtenida el %Mg residual fue de 0.04, lo que conlleva a decir que la eficiencia establecida con respecto a la recuperación del magnesio empleando este método fue correcta (Eficiencia del 35%). La decisión de caracterizar la pieza colada de la fusión B es debido a que en esta fusión se presentó el mayor porcentaje de silicio, de acuerdo con la literatura el silicio además de ser un elemento

grafitizante también es un elemento alfégeno, es decir, promueve la formación de ferrita, pero todo indica que no es lo suficiente como para promover dicha fase, además hay otro elemento que se encuentra por arriba del requerido y es el Mn (0.8%), este elemento aparte de ser un elemento promotor de carburos, también es un estabilizador de la perlita. Con respecto al porcentaje de S y P, el azufre se encuentra dentro de especificación requerida, aunque el fósforo se encuentra por 0.01% más de lo requerido, pero no hay evidencia alguna de formación de esteadita dentro de la matriz.

De acuerdo con las microestructuras obtenidas se puede apreciar en la **Tabla 11** que cuando se incrementa la sección, el tamaño de nódulo se va incrementando y el % de nodularidad va disminuyendo al igual que la densidad de nódulos. Los resultados anteriores tienen una lógica, ya que la solidificación es más rápida en la sección más pequeña y por ende el tamaño de nódulo esperado sería pequeño.

Con respecto a la matriz, de acuerdo a la literatura, altas velocidades de solidificación y enfriamiento, traerá como consecuencia que se genere una matriz completamente perlítica y en el peor de los casos en la matriz se obtendría perlita y carburos ledeburíticos (Ledeburita transformada). Si se observa la caracterización de los diferentes espesores de la pieza, se aprecia que conforme aumenta el espesor, la relación ferrita/perlita se incrementa. En el espesor más pequeño hay presencia de ledeburita transformada debido a la alta velocidad de solidificación y enfriamiento y también por el alto porcentaje de manganeso (0.8%), tal vez para evitar la presencia de este microconstituyente se tendría que proponer otro nivel de inoculación y también bajar el porcentaje de manganeso como máximo a 0.6%.

Prueba 3.

Debido a que en las pruebas anteriores se obtuvieron microestructuras perlíticas-Ferríticas, las cuales no corresponden a un hierro nodular grado 65-45-12, se tomó la decisión de realizar un cambio en las chatarras que se cargan al horno de cubilote (**Tabla 12**). El objetivo principal en esta toma de decisiones, fue para ajustar el contenido de manganeso en el metal líquido ya que con la carga 1, el contenido de manganeso era mayor a 0.5%, reajustando las cargas (carga 2) el contenido de manganeso se redujo a 0.43%, sin embargo, es necesario bajar a 0.4% para que el hierro se encuentre bajo las especificaciones que dicta la norma. En la **Tabla 12** se hace una comparación de las cargas empleadas en la **Prueba 2** y **Prueba 3**

Tabla 12. Cambio de cargas al horno de cubilote. Carga total: 120 kg.

Carga 1 (Prueba 2)	Carga 2 (Prueba 3)
80 Kg de chatarra automotriz.	25 Kg de chatarra automotriz.
40 Kg de arrabio.	25 Kg de retorno de hierro nodular.
	50 Kg de chatarra de hierro nodular.
	20 kg de arrabio.

Los resultados de la composición química obtenida en la **Prueba 3, carga 2**, se muestra en la **Tabla 13**:

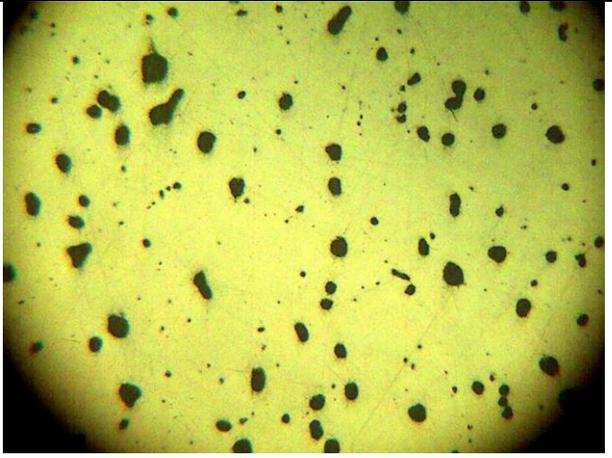
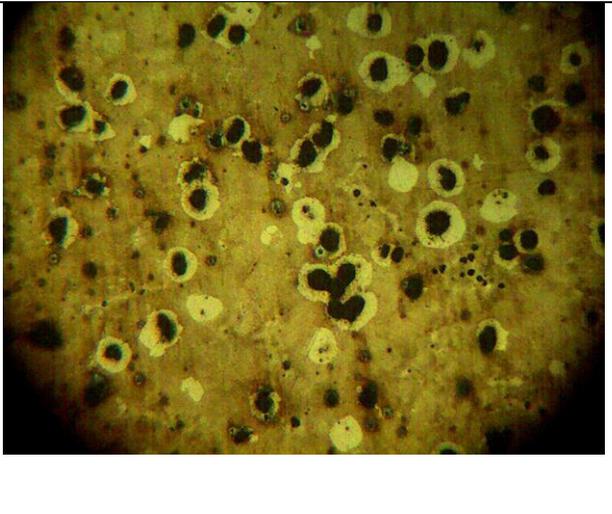
Tabla 13. Composición química obtenida.

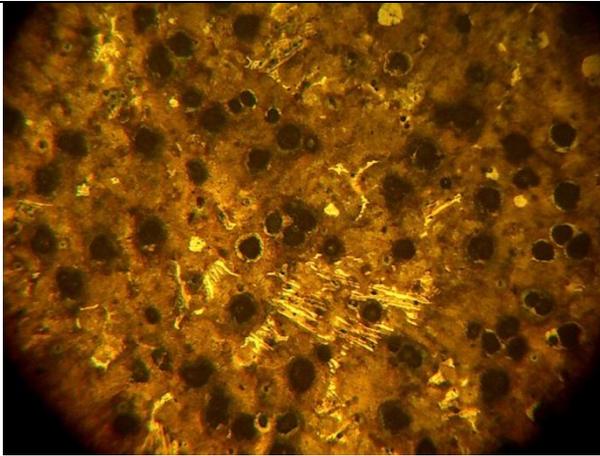
HN clase 65-45-12	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Mg	%Cu	%Cr	%CE
CQ requerida	3.7	2.65	0.4	0.05	0.015	0.045	0	0.1	4.6
Rango de composición química	3.5-3.9	2.5-2.8	0.4 max.	0.05	0.015 max.	0.045	0	0.1 max	
CQ obtenida	3.320	2.440	0.430	0.055	0.022	0.044	0.212	0.162	4.15

Caracterización microestructural y prueba de dureza Brinell para la Prueba 3.

Cabe hacer mención que las piezas que se vaciaron corresponden a una pieza que la empresa fabrica, **Figura 11**. Una vez obtenidas las piezas estas se granallaron y se tomó una muestra de la mismas para llevar a cabo la caracterización metalográfica y la prueba de dureza Brinell. En la **Tabla 14** se muestran los resultados.

Tabla 14. Caracterización de hierro nodular obtenido (Tabla 12).

Microestructura	Observación												
	<p>Microestructura de la pieza con carga 1 (Tabla 12), con inoculación, sin ataque, 100x.</p> <p>HB: 260.</p> <p>Densidad de nódulos: $< 100 \frac{\text{nódulos}}{\text{mm}^2}$</p> <p>Tamaño de nódulo: 6.</p> <p>% Nodularidad: 80.</p> <p>Composición Química:</p> <table border="1" data-bbox="873 1003 1162 1184"> <tr><td>%C</td><td>3.24</td></tr> <tr><td>%Si</td><td>2.950</td></tr> <tr><td>%Mn</td><td>0.80</td></tr> <tr><td>%P</td><td>0.06</td></tr> <tr><td>%S</td><td>0.01</td></tr> <tr><td>%Mg</td><td>0.04</td></tr> </table>	%C	3.24	%Si	2.950	%Mn	0.80	%P	0.06	%S	0.01	%Mg	0.04
%C	3.24												
%Si	2.950												
%Mn	0.80												
%P	0.06												
%S	0.01												
%Mg	0.04												
	<p>Microestructura de la pieza con carga 1 (Tabla 12), con inoculación, atacada con nital 4, 100x.</p> <p>HB: 255.</p> <p>Densidad de nódulos: $< 100 \frac{\text{nódulos}}{\text{mm}^2}$</p> <p>Tamaño de nódulo: 6.</p> <p>% Nodularidad: 80.</p> <p>% ferrita: 15%</p> <p>% perlita: 85%</p> <p>Composición Química:</p> <table border="1" data-bbox="873 1520 1162 1698"> <tr><td>%C</td><td>3.24</td></tr> <tr><td>%Si</td><td>2.950</td></tr> <tr><td>%Mn</td><td>0.80</td></tr> <tr><td>%P</td><td>0.06</td></tr> <tr><td>%S</td><td>0.01</td></tr> <tr><td>%Mg</td><td>0.04</td></tr> </table>	%C	3.24	%Si	2.950	%Mn	0.80	%P	0.06	%S	0.01	%Mg	0.04
%C	3.24												
%Si	2.950												
%Mn	0.80												
%P	0.06												
%S	0.01												
%Mg	0.04												



Microestructura de la pieza con carga 1 (**Tabla 12**) sin inoculación, atacada con nital 4, 100x.

HB: 260.

Densidad de nódulos: $<100 \frac{\text{nódulos}}{\text{mm}^2}$

Tamaño de nódulo: 6.

% Nodularidad: 90.

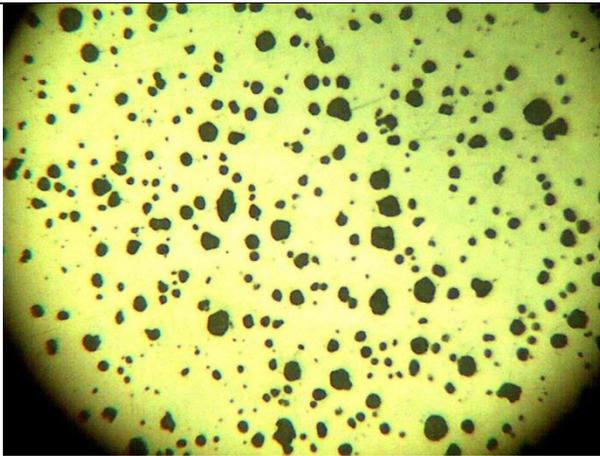
% Ferrita: 5%

% Perlita: 85%

% Carburos: 15 a 20%.

Composición Química:

%C	3.24
%Si	2.950
%Mn	0.80
%P	0.06
%S	0.01
%Mg	0.04



Microestructura de la pieza con carga 2 (**Tabla 12**), con inoculación, sin ataque, 100x.

HB: 220.

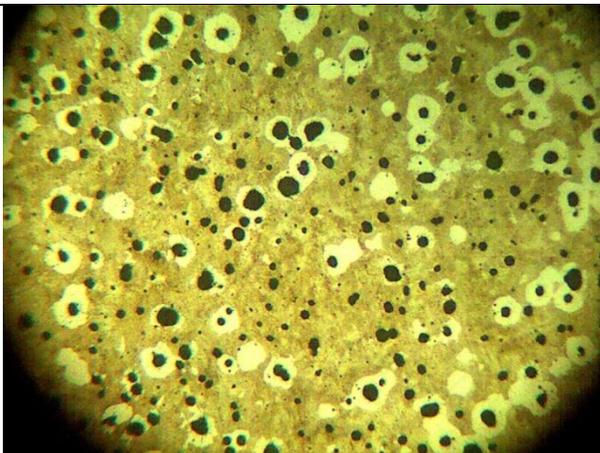
Densidad de nódulos: $200 \frac{\text{nódulos}}{\text{mm}^2}$

Tamaño de nódulo: 6-7.

% nodularidad: 85.

Composición Química:

%C	3.320
%Si	2.440
%Mn	0.430
%P	0.055
%S	0.022
%Mg	0.044



Microestructura de la pieza con carga 2 (**Tabla 12**), sin inoculación, atacada con nital 4, 100x.

HBN: 220.

Densidad de nódulos: $150 \frac{\text{nódulos}}{\text{mm}^2}$

Tamaño de nódulo: 6.

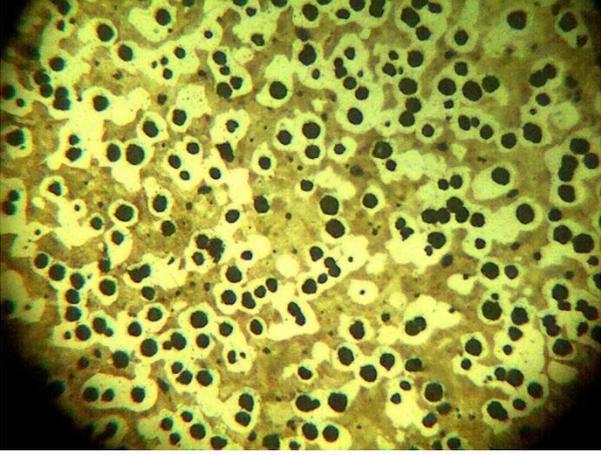
% Nodularidad: 85.

% Ferrita: 25%

% Perlita: 75%

Composición Química:

%C	3.320
%Si	2.440
%Mn	0.430
%P	0.055
%S	0.022
%Mg	0.044



Microestructura de la pieza con carga 2 (**Tabla 12**), con inoculación, atacada con nital 4, 100x.

HBN: 213. Densidad de nódulos: $200 \frac{\text{nódulos}}{\text{mm}^2}$
 Tamaño de nódulo: 6.
 % Nodularidad: 95.
 % ferrita: 45%
 % perlita: 55%

Composición Química:

%C	3.320
%Si	2.440
%Mn	0.430
%P	0.055
%S	0.022
%Mg	0.044

La comparación entre las microestructuras obtenidas a partir de la **Carga 1** y **2** son diferentes. Prácticamente se aprecia en la **Tabla 14** que la proporción ferrita/perlita es mayor en las piezas coladas con la **Carga 2**. Esto se debe principalmente al efecto de la composición química. El %Mn que se obtuvo con la **Carga 1** se encuentra casi a la mitad de lo que presenta la **Carga 2**. Por otra parte, se nota que en la microestructura que se obtiene con la **Carga 1**, en la cual no se llevó a cabo la inoculación, hay presencia de carburos ledeburíticos.

El efecto de la inoculación se ve reflejada en la cantidad de nódulos presentes en la microestructura y en ambos casos (empleando la **Carga 1** y **2**), se aprecia una disminución de los mismos cuando no se lleva a cabo la inoculación.

De manera general, se puede decir que la microestructura obtenida a partir de la **Carga 2** y con la inoculación correspondiente, se acerca más a la microestructura esperada para el hierro nodular grado 65-45-12. Para asegurar este grado, es necesario bajar más el %Mn.

A continuación se muestra en las Figuras 19, 20 y 21, los resultados obtenidos del % de nodularidad, dureza Brinell y cantidad de ferrita respectivamente a partir de lo reportado en la Tabla 14.

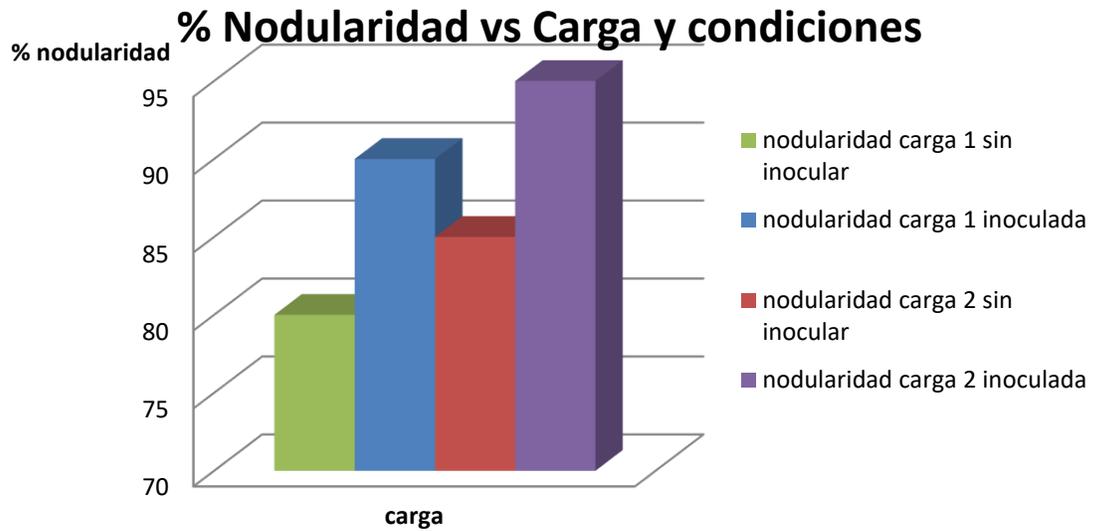


Figura 20. % de nodularidad respecto al nivel de inoculación y cargas en el horno.

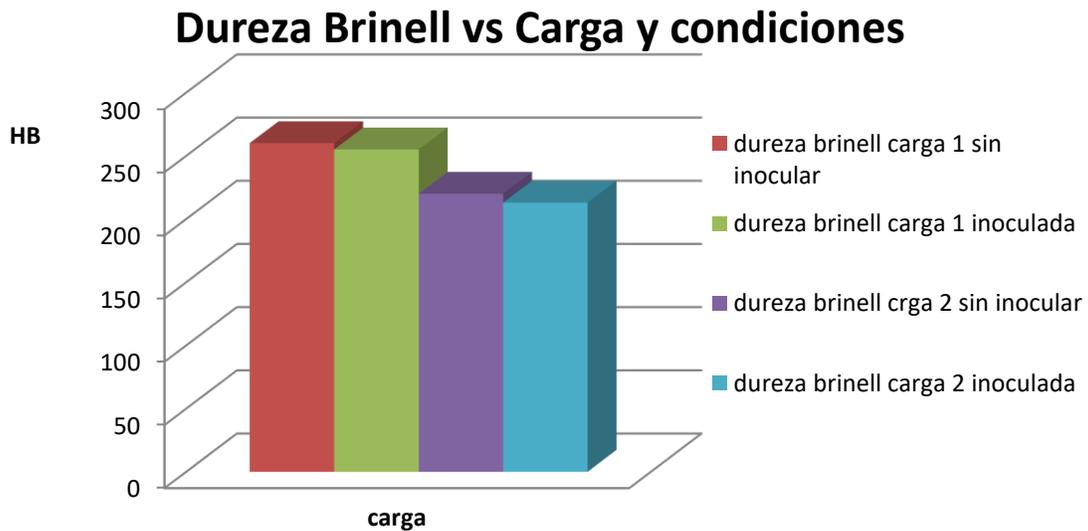


Figura 21. Relación de cargas al horno, inoculación y dureza Brinell.

Porcentaje de ferrita vs Carga y condiciones

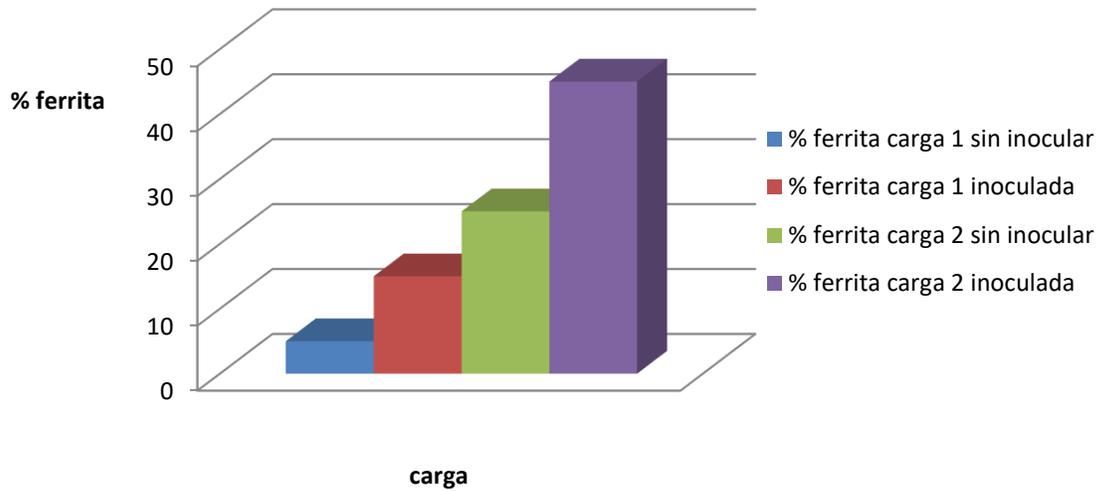


Figura 22. Porcentaje de ferrita en relación a las cargas empleadas en el horno.

Analizando la **Figura 20, 21 y 22**, se tiene que la máxima nodularidad y porcentaje de ferrita se obtuvo con la composición química a partir de la **Carga 2** con inoculación y por ende la menor dureza (mayor ductilidad).

4.3 Variación de las composiciones químicas en el horno de cubilote.

A continuación, se muestra de manera general, el monitoreo de la composición química del metal líquido a la salida del horno por elemento que la conforma, **Figura 23 a la 29**.

variacion del % de C en funcion del tipo de fusion

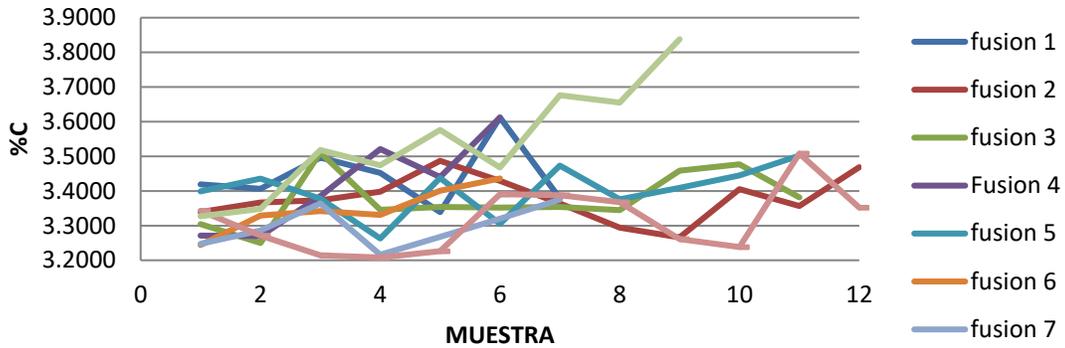


Figura 23. Variaciones del %Carbono durante las fusiones realizadas.

variacion del % de Si en funcion del tipo de fusion

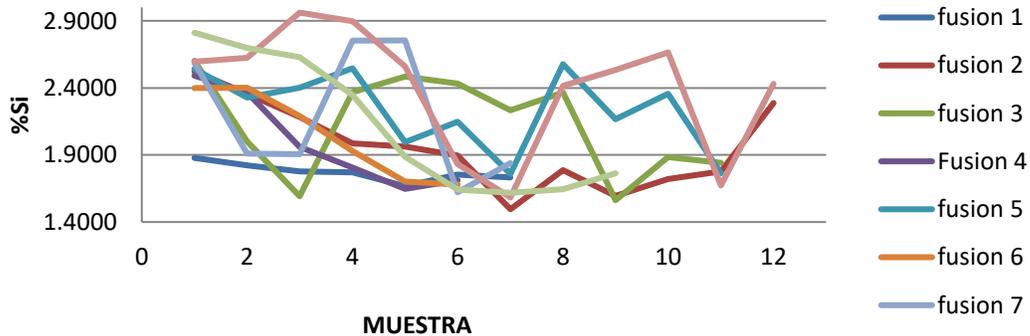


Figura 24. Variaciones del %Silicio durante las fusiones realizadas.

variación del % de Mn en función del tipo de fusión

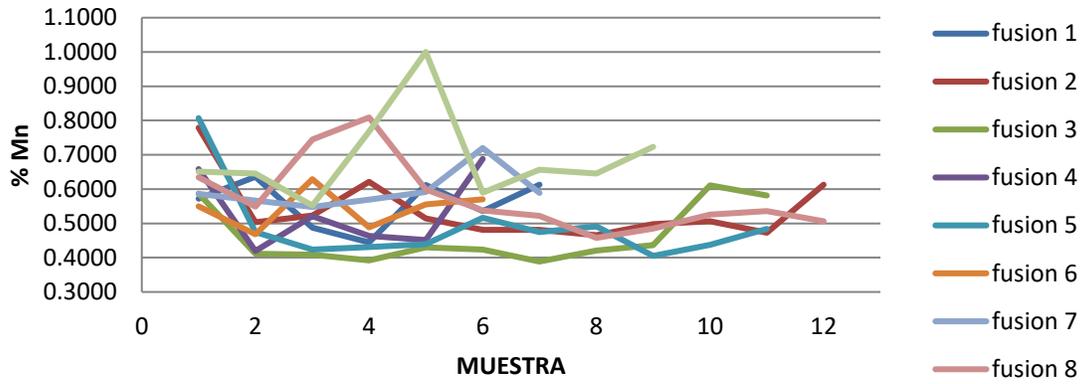


Figura 25. Variaciones del % de manganeso durante las fusiones realizadas.

variación del % de P en función del tipo de fusión

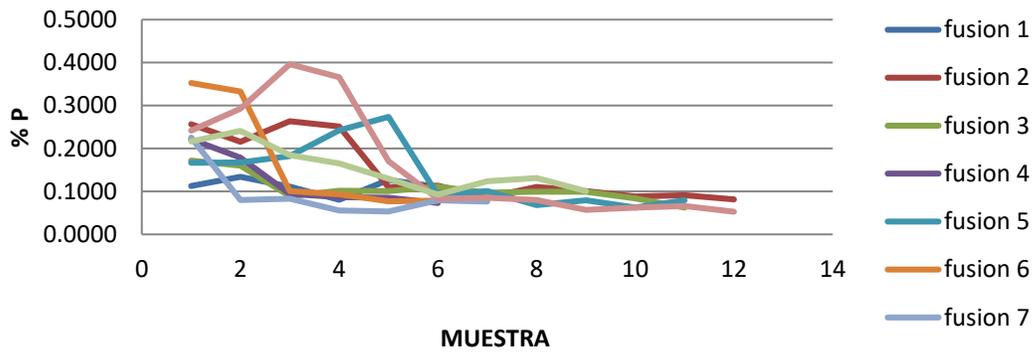


Figura 26. Variaciones del % de fosforo durante las fusiones realizadas.

variacion del % de S en funcion del tipo de fusion

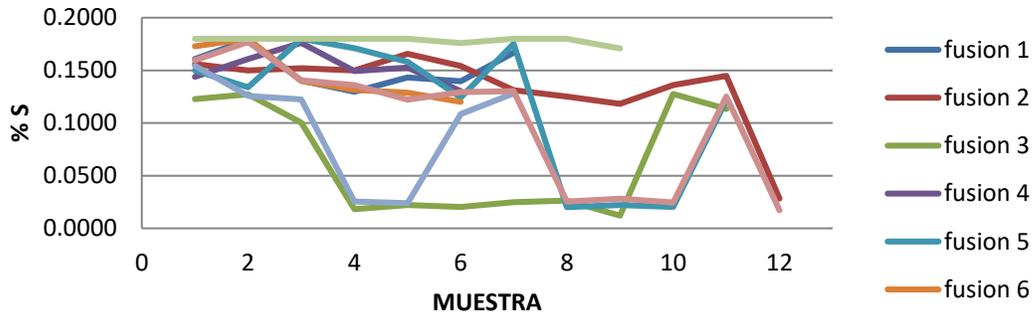


Figura 27. Variaciones del % de azufre durante las fusiones realizadas.

variacion del % de Cu en funcion del tipo de fusion

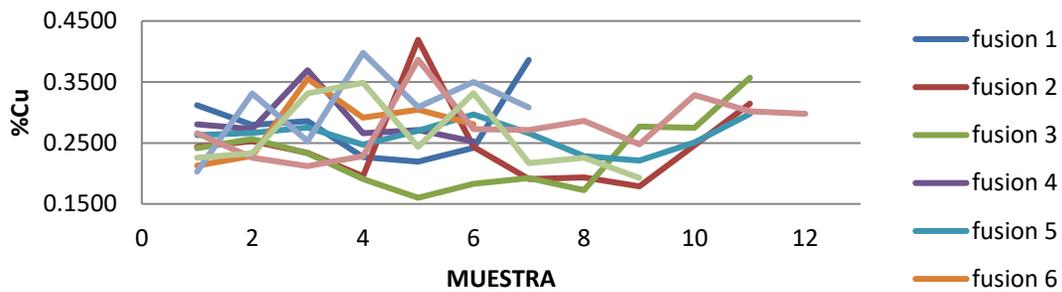


Figura 28. Variaciones del % de cobre durante las fusiones realizadas.

variacion del % de Mg en funcion del tipo de fusion

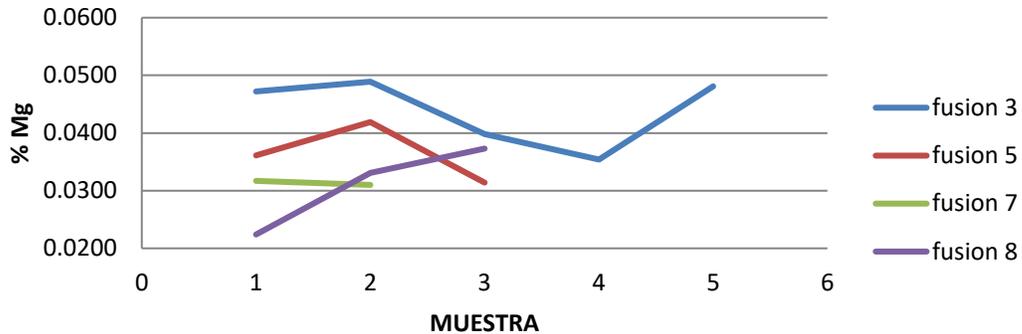


Figura 29. Variaciones del % de magnesio durante las fusiones realizadas

Observando las **Figuras 23 a 29** se puede ver que el contenido de carbono disminuye después de hacer la reacción con Mg en los hierros nodulares y también varía dependiendo de las cargas agregadas al horno el resto de los elementos no tiene una variación tan significativa ya que las carga agregadas al horno no son tan variables excepto cuando se fabrican piezas de secciones delgadas y se tiene que incrementar el contenido de silicio para evitar la formación de carbono combinado.

En el caso de hierro nodular clase 65-45-12 se recomienda agregar chatarra de acero (máximo un 10% de la carga total) con bajos contenidos de manganeso con la finalidad de ir disminuyendo el contenido de éste en el meta líquido ya que con las chatarras con las que se cuenta, el contenido de manganeso no estará por debajo de 0.4% que es el contenido máximo para fabricar el hierro en cuestión.

En las cargas agregadas al horno de cubilote y de acuerdo a las **Figuras 23 a 29**, existen variaciones en los porcentajes de elementos contenidos en el metal obtenido, presentándose una variación de 0.6% para el carbono, 1.5% en silicio y para el resto de los elementos un máximo de

0.4%, esto puede disminuir teniendo un mejor control al cargar las chatarras dentro del horno y teniendo un mejor control al clasificar la chatarra y los retornos de las piezas fabricadas, también es necesario llevar un buen control de las ferroaleaciones agregadas.

Si se llegará adicionar chatarra de acero bajo carbono y con bajo contenido de manganeso se reducirán los contenidos de cobre, cromo y titanio en el metal líquido. Los rendimientos de los elementos contenidos en el hierro se calcularon mediante el balance de carga realizado, en un principio considerando rendimientos del 100% y posteriormente con los datos obtenidos de composición química se realizó un balance restando los contenidos del balance con rendimientos del 100% con lo obtenido experimentalmente, dichos rendimientos se aproximan bastante con los datos experimentales por lo que se puede decir que son confiables para realizar los balances de carga y hacer el ajuste de elementos requeridos para la fabricación del hierro requerido por el cliente, a continuación en la **Tabla 15**, se presentan los rendimientos de cada elemento calculado:

Es importante llevar a cabo una buena técnica de fusión para asegurar la obtención del metal líquido requerido, dicha técnica va desde el balance de carga, acondicionamiento de la chatarra hasta los tratamientos al metal líquido, como son la nodularización e inoculación, esto con el fin de tener una buena calidad metalúrgica en el metal fabricado.

Después de realizar el balance de carga, se debe determinar la técnica de fusión y se procede a cargar el horno. Se realizan las adiciones correspondientes de faltantes para el ajuste de los elementos como silicio y recarburante que en este caso es difícil ya que no es posible incorporar de manera adecuada el carbono al metal líquido por el tipo de fusión que se lleva a cabo dentro del horno.

Una manera de poder incorporar el carbono en el metal líquido es agregar carbón vegetal a las cargas para incrementar un poco el contenido de carbono, también se puede agregar recarburante en la cuchara de sangrado mientras esta se va llenando de metal líquido, el recarburante se incorporará en el metal y de esta manera también aumentará el contenido de carbono en el metal líquido.

Para la fabricación del hierro nodular se emplea un método parecido a olla método sandwich. El FeSiMg se coloca en el fondo de la olla de tratamiento y posteriormente se agrega una cobertura de arena Shell sobre la ferroaleación, la cantidad de FeSiMg agregado se calculó con una eficiencia de recuperación del magnesio del 35% establecida por el mismo método.

La desulfuración del metal se lleva a cabo mediante a adición de carbonato de sodio (Na_2CO_3) antes de realizar la nodularización del metal líquido.

Cabe mencionar que durante la reacción de nodularización la pérdida de carbono oscila en un 0.2% por lo que es necesario aumentar el nivel de carbono antes de realizar la reacción o cambiar el método de nodularización, una propuesta para evitar esta pérdida es incorporar más arrabio en las cargas.

En las pruebas realizadas para la fabricación del hierro nodular, es claramente visible en las imágenes de las metalografías realizadas que hay un cambio en las microestructuras presentes en el hierro esto debido al cambio de cargas agregadas al horno y la inoculación realizada en las piezas ya que al hacer estos cambios aumento el contenido de ferrita presente en la matriz del hierro, disminuyo la dureza, aumento la densidad de nódulos y se evitó la presencia de carburos en la matriz.

Los resultados obtenidos en las prueba de hierros nodulares no se ajustan a la composición química esperada, sin embargo se logró un gran cambio en las microestructuras presentes en el hierro, la composiciones químicas obtenida se aproximan a lo especificado en la norma ASTM A536, se deben controlar más las chatarras cargadas al horno para ajustar la composición química según la norma, las composiciones químicas obtenidas se ajustan más a los hierros nodulares grado 80-55-06 y 100-70-03, los cuales se pueden fabricar haciendo solo un ajuste en el carbono requerido.

Capítulo 5. Conclusiones.

A continuación, se describen de manera puntual las conclusiones del presente trabajo:

- El funcionamiento del horno de cubilote diseñado y construido cumplió de manera satisfactoria durante la fabricación de los hierros nodulares.
- Para este horno de cubilote, se determinaron las eficiencias por elemento, ya que estas son importantes para el cálculo de los balances de carga.
- Se debe tener un buen control de las chatarras cargadas al horno de cubilote para lograr tener un hierro nodular con las propiedades y característica requeridas por la norma.
- No se logró obtener el hierro nodular grado 65-45-12 debido a las chatarras empleadas.
- El porcentaje de Azufre debe de ser el mínimo posible y estar muy por debajo del nivel máximo para evitar que reaccione con el Mg y anular la formación de los esferoides, es por ello que se requiere realizar la desulfuración.
- La técnica de adición del inoculante en el molde es crítica en la obtención de un hierro nodular de calidad con altas propiedades mecánicas y una microestructura homogénea.
- El análisis de la microestructura permite conocer cualitativamente las propiedades mecánicas de la pieza y decidir si este cumple con los requerimientos mínimos.
- Aun estando dentro de la composición química y presentar la microestructura apropiada junto con propiedades mecánicas, es indispensable controlar los defectos físicos de la pieza producidas.

- Se debe controlar la temperatura de colada y la velocidad de colada, para evitar que solidifique la pieza a diferentes velocidades, esto genera esfuerzos residuales en esta sección discontinua y fragiliza la pieza.
- Al no escorificar el metal líquido antes del vaciado a la olla y al molde, se generan defectos internos en la pieza como atrapamiento de escoria y porosidades irregulares.

Bibliografía.

1. http://recursosbiblio.url.edu.gt/Libros/2013/cmI/10Hornos_industriales.pdf (Fecha de consulta: 4 de octubre de 2018).
2. American Foundrymen 's Society 1983, El horno de cubilote y su operación, México, Compañía editorial continental S.A de C.V.
3. Martín A., Madías J. 22 y 23 de noviembre de 2007, Influencia de las propiedades del coque sobre los parámetros metalúrgicos y el consumo de coque en el horno de cubilote, Buenos Aires, Argentina, 3° Congreso Latinoamericano de Fundición (COLFUN).
4. Sujarchuk, Y.S, Jundkin, A.K., 1989, Fusión del hierro fundido en hornos de cubilote. Moscú, Editorial Construcción de Maquinaria.
5. Golón Valenzuela Mynor Geovanni, 2009, Diseño de un recuperador de calor para el horno tipo cubilote del taller de fundición, J.A. Ramírez, Tesis de Licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala.
6. Rio Tinto Iron & Titanium Inc. DUCTILE IRON The essentials of gating and risering system design. Montréal (Québec) Canada 770 Sherbrooke Street West – Suite 1800.
7. L. Achour, M. Martínez Gamba, R. Boeri y J. Sikora, Agosto de 2000. Determinación de parámetros de colada para la obtención de piezas de pequeños espesores en fundición con grafito esferoidal. Sanfandila, Qro, Jornadas SAM 2000 - IV Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga.

8. <http://hierronodular.blogspot.mx/>. Consultado 07/04/2016.
9. Acosta Esqueda Miguel Antonio, Martínez Madrid Miguel, Alfredo López José, 2000. EL TRATAMIENTO DE LOS HIERROS NODULARES EN EL MEJORAMIENTO DE LOS MATERIALES EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ. Publicación Técnica No. 148.
10. Rio Tinto Iron & Titanium Inc. DUCTILE IRON The essentials of gating and risering system design. , Montréal (Québec) Canada 770 Sherbrooke Street West – Suite 1800.

Sugerencias:

- a) Implementar chatarra de acero con bajo porcentaje de manganeso para lograr obtener un hierro nodular grado 65-45-12.
- b) Agregar arrabio en las cargas al horno para incrementar el contenido de carbono en el metal líquido.
- c) Realizar inoculación tardía para incrementar la densidad de nódulos y evitar el blanqueado.
- d) Controlar y seleccionar las chatarras y retornos cargadas al horno para la fabricación del hierro nodular.

Seguimientos:

- a) Seguir realizando pruebas para la obtención del hierro nodular grado 65-45-12 y monitorear el contenido de manganeso y carbono en el metal líquido.
- b) Realizar cálculos de sistema de alimentación y colada para las piezas.
- c) Hacer una planeación de mantenimiento para la calibración del espectrómetro de emisión de masas.
- d) Implementar prueba de Coupon Test para evaluar la calidad microestructural de los hierros nodulares.

Anexo 1

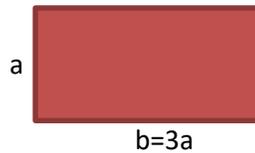
Cálculo del Sistema de colada para modelo de pieza escalonada.

Datos requeridos para el cálculo del sistema de colada [10]:

- Volumen de la pieza: 1565.78 cm³
- Metal demandado: 11.117 Kg
- Sistema de colada: 1 bajada, 1corredor, 1 entrada y 1 choke.

- Área transversal del choke.

$$A = \frac{V}{ft\sqrt{2gh}} = 3.7107\text{cm}^2$$



$$V=1.565 \times 10^{-3} \text{m}^3$$

Factor por fricción, $f_r=0.2$

$$A = a * b = a * 3a = 3a^2$$

Tiempo de llenado, $t=11\text{s}$

$$a = \sqrt{\frac{A}{3}} = 1.112\text{cm}$$

$g=9.81\text{m/s}$

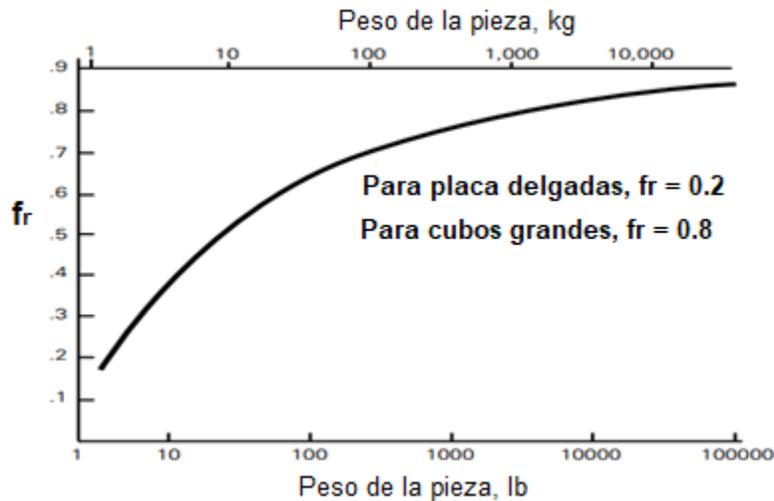


Figura 30. Determinación del factor de fricción.

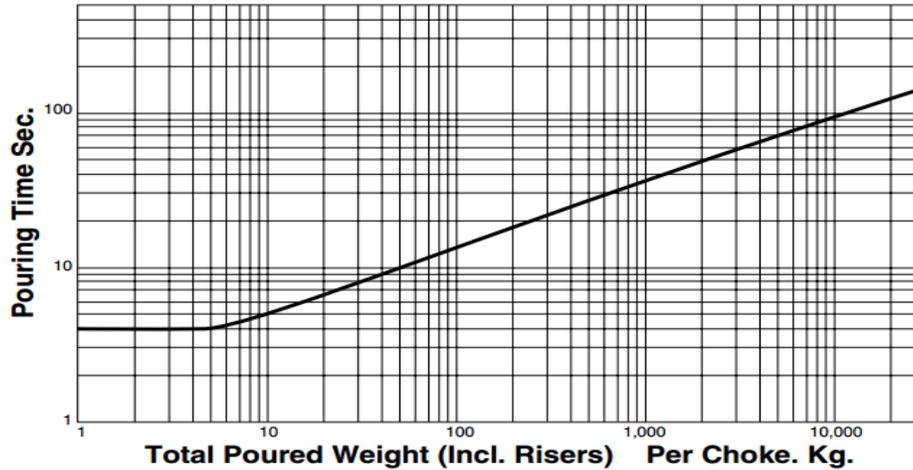
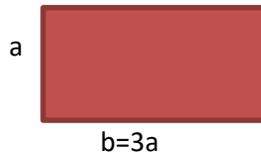


Figura 31. Determinación del tiempo de llenado.

- Área transversal de corredores.

$$A_{\text{trans. total corredor}} = 3A_{\text{choke}}$$

$$A_{\text{trans. total corredor}} = 11.1312\text{cm}^2$$



$$A = a * b = a * 3a = 3a^2$$

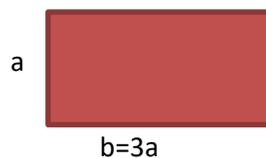
$$a = \sqrt{\frac{A}{3}} = 1.92\text{cm}$$

$$b = 3a = 5.7787\text{cm}$$

- Área transversal de las entradas.

$$A_{\text{trans. total entradas}} = 4A_{\text{choke}}$$

$$A_{\text{trans. total entrada}} = 14.84\text{cm}^2$$



$$A = a * b = a * 3a = 3a^2$$

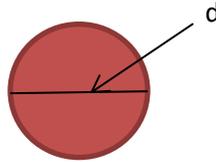
$$a = \sqrt{\frac{A}{3}} = 2.224\text{cm}$$

$$b = 3a = 6.67\text{cm}$$

- Área transversal de la bajada.

$$A_{\text{trans. bajada}} = 2A_{\text{choke}}$$

$$A_{\text{trans. bajada}} = 7.421\text{cm}^2$$



$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = 1.181\text{cm}$$

- Área transversal y altura del Colchón

$$A_{\text{trans.colchon}} = 2A_{\text{choke}}$$

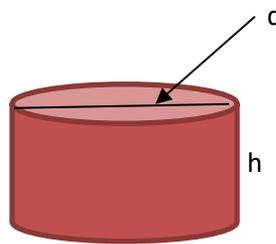
$$A_{\text{trans.colchon}} = 7.42\text{cm}^2$$

$$A = \pi * \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \pi * \frac{d^2}{4}$$

$$d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = 4.72$$

$$h = 2b_{\text{corredor}}$$

$$h = 8.17\text{cm}$$



Anexo 2.
Patrones para la caracterización de los hierros nodulares.

Tamaño de nódulo.

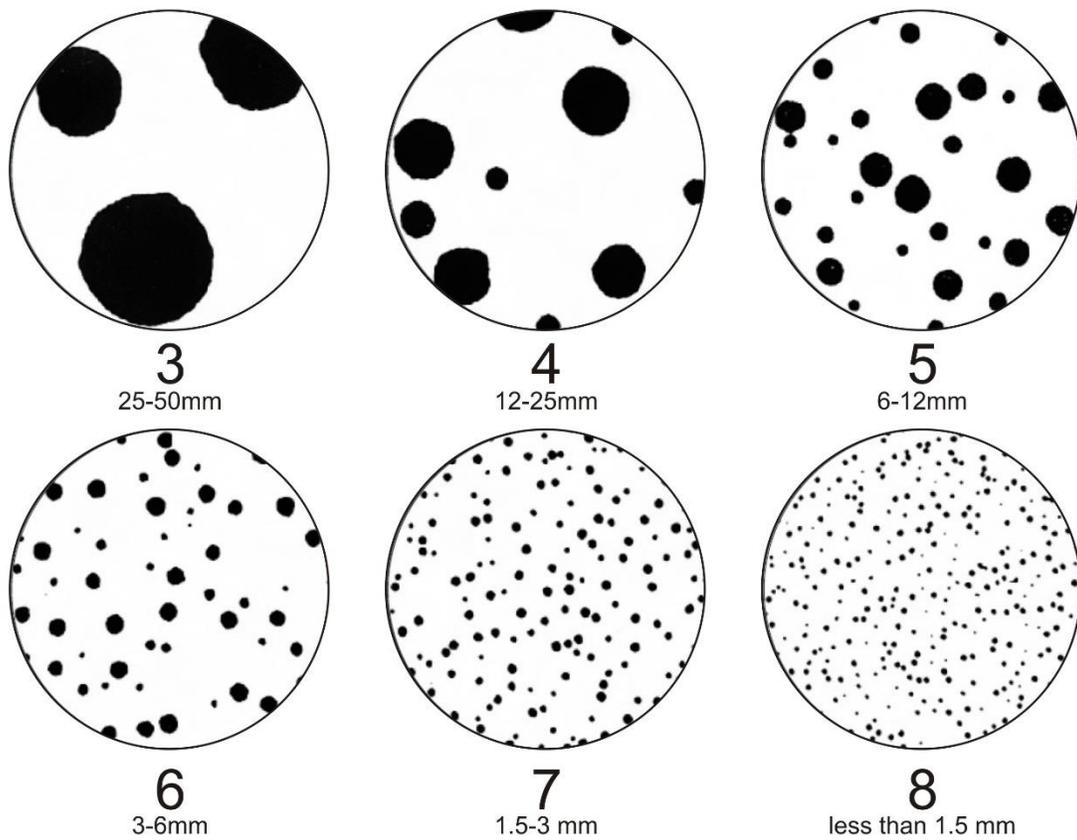


Figura 32. Patrones para determinar el tamaño de nódulo en el hierro nodular evaluadas a un aumento de 100X sin ataque.

Densidad de nódulos

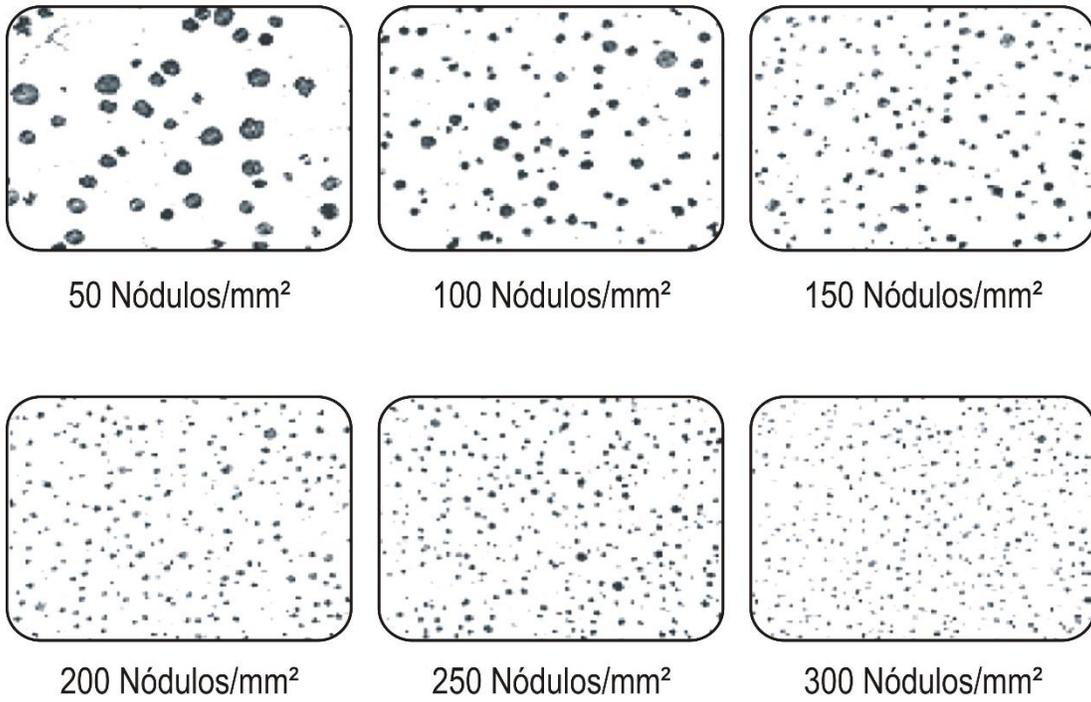


Figura 33. Patrones utilizados para evaluar la densidad de nódulos presentes. Determinadas a un aumento de 100X sin ataque.

Porcentaje de nodularidad

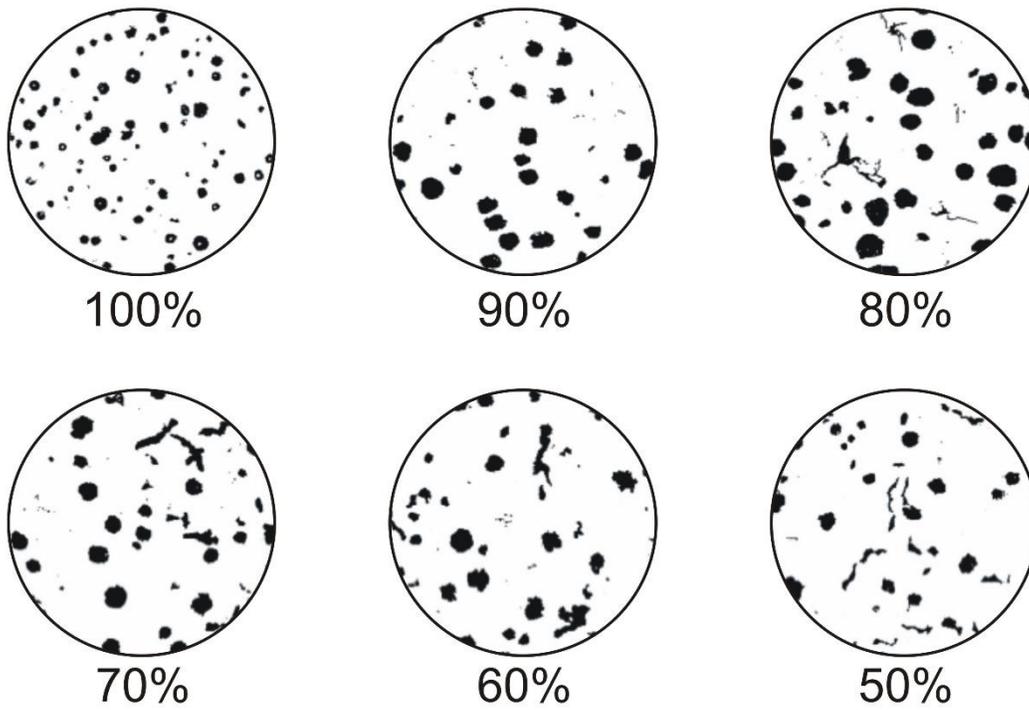
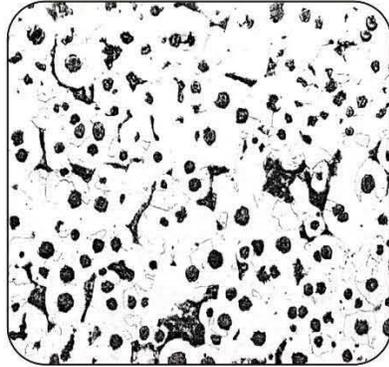
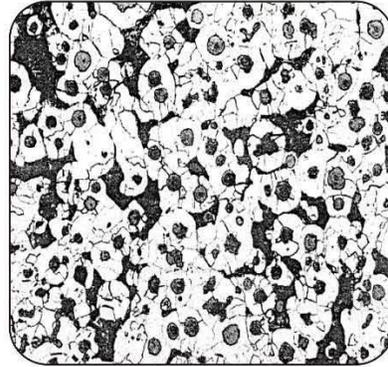


Figura 34. Patrones para determinar el porcentaje de nodularidad evaluadas a un aumento de 100X sin ataque.

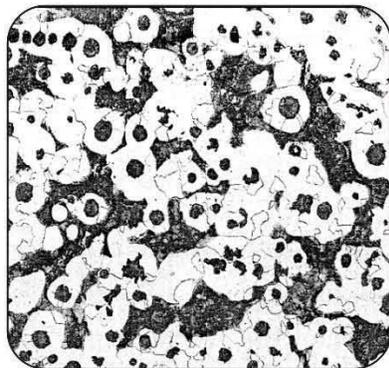
Tipo de matriz



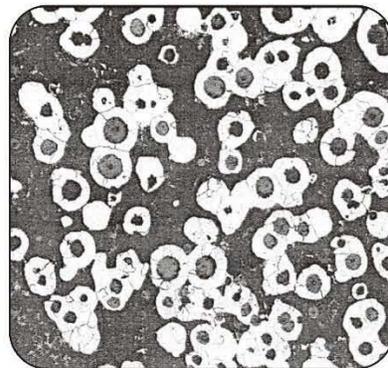
10% Perlita - 90% Ferrita



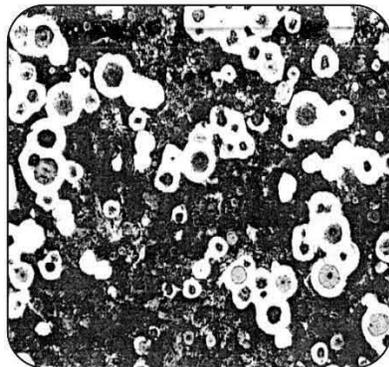
15% Perlita - 85% Ferrita



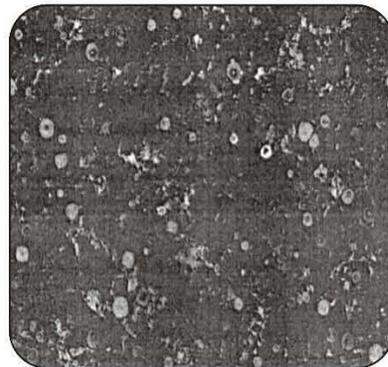
25% Perlita - 90% Ferrita



50% Perlita - 85% Ferrita



75% Perlita - 90% Ferrita



100% Perlita - 85% Ferrita

Figura 35. Patrones para determinar el porcentaje de perlita y de ferrita presentes en la matriz de hierro nodular, ataque con Nital y evaluadas a un aumento de 100X.