

EVALUACIÓN DE LOS MÉTODOS DE CONTROL DE CALIDAD EN LA
FABRICACIÓN DE PIEZAS EN FUNDICIÓN NODULAR EN
FUNDICIONES DE METALES DE LIMA LTDA.

DIANA MAYERLLY BAUTISTA DIAZ
EIVY DAYAN JEREZ SALAZAR

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE
MATERIALES
BUCARAMANGA
2005

EVALUACIÓN DE LOS MÉTODOS DE CONTROL DE CALIDAD EN LA
FABRICACIÓN DE PIEZAS EN FUNDICIÓN NODULAR EN
FUNDICIONES DE METALES DE LIMA LTDA.

DIANA MAYERLLY BAUTISTA DIAZ
EIVY DAYAN JEREZ SALAZAR

Trabajo de Grado para optar el título de
Ingeniera Metalúrgica

Tutor
ALVARO DE LIMA GUZMÁN
Ingeniero Industrial

Cotutor
ARNALDO ALONSO BAQUERO
Ingeniero Metalúrgico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE
MATERIALES
BUCARAMANGA
2005

A Odila y Manuel Antonio, mis Padres.

A Maria Díaz y mis hermanitos:

*Quienes siempre me han alimentado de
su amor día a día, fortaleciendo mi
alma y mi espíritu, para así
afrentar toda adversidad.*

A Cleotilde Salazar Arenales, mi madre:

*De quien me enorgullezco. Sin su
apoyo, consejos y amor
no habría llegado
tan lejos.*

**TITULO: EVALUACIÓN DE LOS MÉTODOS DE CONTROL DE CALIDAD EN
LA FABRICACIÓN DE PIEZAS EN FUNDICIÓN NODULAR
EN FUNDICIONES DE METALES DE LIMA LTDA. ***

**AUTORES: DIANA MAYERLLY BAUTISTA DIAZ
EIVY DAYAN JEREZ SALAZAR. ****

PALABRAS CLAVES: Arena, Fundición Nodular, Tratamientos Esferoidizantes,
Cubilote

DESCRIPCIÓN

En este trabajo práctico se estudió la relación entre la calidad de la fundición nodular y el porcentaje de Mg residual teniendo en cuenta el problema de la fragilidad del metal en la empresa. Durante la práctica varios ensayos de composición y tracción fueron hechos, cada uno en diferentes días de trabajo. El horno cubilote trabajaba en colada intermitente y en cada tratamiento se tomaba una muestra de composición y tracción de acuerdo con normas internacionales (ASTM). Estos ensayos fueron hechos al mismo tiempo porque las propiedades mecánicas del hierro dúctil dependen directamente de la composición del metal y exactamente del magnesio residual que es agregado en la ferroaleación usada para el tratamiento. La cantidad de esta ferroaleación fue modificada hasta encontrar el porcentaje de Mg residual más apropiado y las mejores propiedades mecánicas.

Simultáneamente con este trabajo, la calidad y propiedades de las arenas de moldeo también fueron estudiadas; características como porcentaje de humedad, compactibilidad, granulometría y porcentaje de arcilla eran controladas en laboratorios externos ya que la compañía no contaba con el equipo adecuado para esto; por lo tanto, durante la práctica fue instalado y adecuado un laboratorio de análisis de arenas en la compañía.

La instalación del laboratorio se inició con la construcción de la planta física del mismo y posteriormente se instalaron los equipos adquiridos para el laboratorio; estos equipos fueron un equipo para el análisis granulométrico, una lámpara para el ensayo de humedad, un equipo de compactibilidad y una balanza digital; y la construcción de un equipo de lavado de arcilla. Los ensayos para las arenas fueron llevados a cabo de acuerdo con las normas AFS.

* *Práctica Empresarial*

** *Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y
Ciencia de Materiales, Álvaro de Lima Guzmán*

TITLE: EVALUATION OF QUALITY CONTROL METHODS IN MANUFACTURING OF PARTS IN DUCTILE IRON IN FUNDICIONES DE METALES DE LIMA LTDA. *

**AUTHORS: DIANA MAYERLLY BAUTISTA DIAZ
EIVY DAYAN JEREZ SALAZAR. ****

KEY WORDS: Sand, Ductile Iron, Spheroidizing Treatment, Cupola

DESCRIPTION:

In this practical research the relation between the quality of ductile iron and the percent of residual magnesium was studied, according to fragile metal problem, which the company had in its production. During the time of the practice, many tests like composition and tensile were run out, each one in different working days. The cupola furnace was working in pouring and in each treatment, one sample for composition and tensile tests were took according to the international standard (ASTM). These tests were done at the same time, because the mechanical properties of ductile iron depend on the metal composition and exactly of residual magnesium that is content by the ferroalloy used for the treatment. The amount of this ferroalloy was modified until found the best percent of residual magnesium and the best mechanical properties.

Simultaneously with this work, the quality and properties of sand mold was studied too; characteristics as percent of humid, compactability, granulometry and percent of clay was controlled in others laboratories, because the company did not have the suitable equipment for that. Therefore, during the practice, the setup an adequate laboratory for the analysis of the sands in the company was decided.

The laboratory setup began with the construction of physical plant and then the equipment was installed; this equipment consisted in a machine for the granulometry analysis, a lamp for the humid test, an equipment of compactability and a digital balance; and the construction of a rig for wash clay; all the sand tests were carried out according to the AFS standard.

* *Managerial Practice*

** *Ability of Engineerings Phisico-Chemical, Engineering Metallurgic and Science of Materials, Alvaro de Lima Guzmán*

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO TEÓRICO	2
1.1 CONTROL DE LA ARENA EN VERDE	2
1.1.1 Métodos de control de la arcilla	4
1.1.2 Mezclado de la arena	5
1.1.3 Recirculación de la arena	6
1.2 FUNDICIÓN NODULAR	7
1.2.1 Principales elementos constituyentes de la fundición esferoidal	9
1.2.2 Fabricación de la fundición esferoidal	16
1.2.3 Procedimientos usados en los tratamientos esferoidizantes	19
1.2.3.1 Procedimiento de la fundición con tratamiento de magnesio puro	19
1.2.3.2 Métodos de tratamiento de la fundición con aleaciones de escasa densidad	20
1.2.3.3 Método de la fundición con aleaciones pesadas	21
1.2.4 Dificultades de producción de la fundición esferoidal	21
1.2.5 Propiedades de las fundiciones dúctiles	23
1.2.6 Controles de la fusión en el cubilote	25
1.3 EL CUBILOTE	28
1.3.1 Toberas	31
1.3.2 Aparatos de medida del soplo	33

2. CARACTERIZACIÓN DE LA EMPRESA	35
2.1 RESEÑA HISTÓRICA	35
2.2 RAZÓN SOCIAL	35
2.3 DESCRIPCIÓN DE LAS ETAPAS DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE PIEZAS EN HIERRO NODULAR	36
2.3.1 PREPARACIÓN DE MEZCLAS DE ARENA	37
2.3.1.1 Arena en verde	37
2.3.1.2 Arenas especiales y para machos	38
2.3.2 FABRICACIÓN DEL MOLDE	39
2.3.2.1 Moldeo en máquina	39
2.3.2.2 Moldeo en piso	40
2.3.3 FUSIÓN	42
2.3.3.1 Cubilote	42
2.3.3.2 Horno rotatorio	46
2.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS MÉTODOS DE CONTROL DE CALIDAD	47
2.4.1 Preparación de mezclas de arena	47
2.4.1.1 Materias primas para la preparación de mezclas de arena en verde y especiales	47
2.4.1.2 Determinación de la humedad	48
2.4.2 FABRICACIÓN DEL MOLDE DE ARENA EN VERDE	48
2.4.2.1 Determinación de la dureza	48
2.4.2.2 Inspección visual	49
2.4.3 MATERIAS PRIMAS PARA LA FABRICACIÓN DEL METAL BASE	49
2.4.4 CONTROLES DE LA OPERACIÓN DEL CUBILOTE	50
2.4.5 CONTROLES AL METAL BASE	51
2.4.5.1 Medición de la temperatura	51
2.4.5.2 Determinación de la composición	51
2.4.5.3 Control de cargas del cubilote	51
2.4.6 CONTROLES AL TRATAMIENTO DE INOCULACIÓN Y	

ESFEROIDIZACIÓN	52
2.4.6.1 Inspección visual a las materias primas para la inoculación y esferoidización	52
2.4.6.2 Control del tiempo de colada	52
2.4.6.3 Determinación del peso de ferroaleaciones inoculantes y esferoidizantes	52
2.4.7 CONTROLES AL METAL YA TRATADO	52
2.4.7.1 Control de composición	52
2.4.7.2 Prueba de cuña	53
2.4.7.3 Ensayo de doblez	53
2.4.8 CONTROLES A LAS PIEZAS YA TERMINADAS	53
2.4.8.1 Ensayo de metalografía	53
2.4.8.2 Inspección visual	54
2.4.8.3 Control dimensional	54
2.5 EQUIPOS UTILIZADOS EN EL CONTROL DE CALIDAD	55
2.5.1 Espectrómetro de chispa	55
2.5.2 Microscopio	55
3. DIAGNÓSTICO AL CONTROL DE CALIDAD EN FUNDICIONES DE METALES DE LIMA LTDA.	56
3.1 PREPARACIÓN DE MEZCLAS DE ARENA EN VERDE Y ESPECIALES	56
3.2 FABRICACIÓN DE MOLDES EN ARENA EN VERDE	57
3.3 FABRICACIÓN DEL METAL BASE	57
3.4 OPERACIÓN DEL CUBILOTE	58
3.5 TRATAMIENTO DE INOCULACIÓN Y ESFEROIDIZACIÓN	62
3.6 METAL TRATADO	63
3.7 PRODUCTO TERMINADO	64
4. ENSAYOS Y CONTROLES PROPUESTOS	65

4.1 CONTROL DE MEZCLAS DE ARENA DE MOLDEO	65
4.1.1 Determinación de arcilla AFS	65
4.1.2 Determinación de la humedad	66
4.1.3 Análisis granulométrico	67
4.1.4 Ensayo de compactabilidad	69
4.2 FABRICACIÓN DEL METAL BASE	69
4.3 TRATAMIENTO DE INOCULACIÓN Y ESFEROIDIZACIÓN	69
4.4 OPERACIÓN DEL CUBILOTE	70
4.5 METAL TRATADO	70
4.6 REGISTRO FOTOGRÁFICO	71
5. RESULTADOS	79
5.1 PREPARACIÓN DE ARENA EN VERDE	79
5.1.1 Ensayos realizados a la mezcla de arena utilizada para el moldeo muestra B	80
5.2 OPERACIÓN DEL CUBILOTE	84
5.3 TRATAMIENTO DE INOCULACIÓN Y ESFEROIDIZACIÓN	86
5.3.1 Antes de ajustar el peso de ferroaleación	87
5.3.2 Resultado final	90
5.4 METAL TRATADO	92
6. ANALISIS DE RESULTADOS	93
7. CONCLUSIONES	98
8. RECOMENDACIONES	99

9. APORTES	101
9.1 Arenas	101
9.2 Proceso	101
9.3 Aspecto económico	102
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Compactadora típica de arena con sus partes indicadas	3
Figura 2. Presentación esquemática del ciclo de arena de fundición	7
Figura 3. Observación de las gotas de fundición en las toberas	26
Figura 4. Efecto de la velocidad del aire y la inclinación de las toberas sobre la forma y altura de la zona de combustión	31
Figura 5. Esquema del tratamiento de esferoidización	45
Figura 6. Medida de la altura de la cama de coque	59
Figura. 7 Diagrama reticular estándar de un cubilote de viento frío enfriado con agua, según Jungbluth	60
Figura 8. Efecto de la inclinación de las toberas sobre la forma y altura de la zona de combustión	61
Figura 9. Materiales para el ensayo de arcillas	71
Figura 10. Desviadores verticales y agitador eléctrico	71
Figura 11. Equipo de lavado de arcillas	72
Figura 12. Antigua balanza	73
Figura 13. Balanza digital	73
Figura 14. Tamizadora	74
Figura 15. Equipo de compactabilidad	74
Figura 16. Situación inicial. Pérdida de material	75
Figura 17. Terminación del piso de concreto para el acero	75
Figura 18. Coquilla de Composición	76
Figura 19. Dinamómetro	76
Figura 20. Zona de la Planta Física a remodelar	77
Figura 21. Iniciación de la obra	77
Figura 22. Mesón terminado	77
Figura 23. Instalación de equipos	77

Figura 24. Laboratorio de arenas	78
Figura 25. Distribución granulométrico de la muestra B ensayo hecho en el Laboratorio de Arenas de HIDROMAC S.A.	81
Figura 26. Distribución granulométrica de la muestra B, ensayo hecho en Fundiciones de Metales De Lima Ltda.	83
Figura 27. Microestructura de fundición nodular sin ataque aumento 10X correspondiente a la composición mostrada en la tabla 17	88
Figura 28. Microestructura de fundición nodular con ataque aumento 10X correspondiente a la composición mostrada en la tabla 17	89
Figura 29. Microestructura de fundición nodular con ataque aumento 20X correspondiente a la composición mostrada en la tabla 17	89
Figura 30. Microestructura de fundición nodular sin ataque 10X correspondiente a la composición mostrada en la tabla 20	90
Figura 31. Microestructura de fundición nodular con ataque 10X correspondiente a la composición mostrada en la tabla 20	91
Figura 32. Microestructura de fundición nodular con grafito vermicular sin ataque, aumento 10X	93
Figura 33. Microestructura de fundición nodular con grafito vermicular con ataque, aumento 10x	94
Figura 34. Piezas rechazadas por fragilidad (11 kg de ferroaleación)	103
Figura 35. Piezas rechazadas por fragilidad (7.2 kg de ferroaleación)	103

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Variación del rendimiento para diferentes porcentajes de Mg	13
Tabla 2. Principales aleaciones esferoidizantes	19
Tabla 3. Número de toberas en función del diámetro interno del cubilote	32
Tabla 4. Materias primas para arenas especiales	38
Tabla 5. Formato para la presentación de resultados del ensayo Granulométrico	68
Tabla 6. Resultados preliminares de los ensayos hechos a la muestra A	79
Tabla 7. Ensayos hechos a la muestra B en el Laboratorio de Arenas de HIDROMAC S.A.	80
Tabla 8. Análisis granulométrico hecho a la muestra B en el Laboratorio de Arenas de HIDROMAC S.A.	80
Tabla 9. Ensayos hechos a la muestra B en el Laboratorio de Arenas de Fundiciones de Metales De Lima Ltda.	81
Tabla 10. Análisis granulométrico hecho a la muestra B en el Laboratorio de Arenas de Fundiciones de Metales De Lima Ltda.	82
Tabla 11. Clasificación de las arenas de acuerdo al índice de finura	83
Tabla 12. Medidas de la velocidad del aire en el circuito	84
Tabla 13. Caudal de aire en la tubería con diámetro de 0.0706 m ² y posición del diafragma en 7	85
Tabla 14. Características dimensionales y caudales medidos en los venturi superior e inferior.	85
Tabla 15. Caudal total en la tubería	85
Tabla 16. Caudales medidos en los venturi luego de establecer la altura definitiva de las columnas de agua	86
Tabla 17. Análisis espectrométrico hecho a una muestra de fundición nodular	

empleando 9.5 kg de Ferroaleación y 240 kg de metal base	87
Tabla 18. Características del grafito en una muestra metalográfica de fundición nodular correspondiente a la composición mostrada en la tabla 17	88
Tabla 19. Distribución de fases en una muestra metalográfica de fundición nodular correspondiente a la composición mostrada en la tabla 17	88
Tabla 20. Análisis espectrométrico hecho a una muestra de fundición nodular empleando 7.2 kg de Ferroaleación y 240 kg de metal base	90
Tabla 21. Características del grafito en una muestra metalográfica de fundición nodular correspondiente a la composición mostrada en la tabla 20	91
Tabla 22. Distribución de fases en una muestra metalográfica de fundición nodular correspondiente a la composición mostrada en la tabla 20	92
Tabla 23. Propiedades mecánicas del hierro nodular correspondiente a la composición de la tabla 20	92
Tabla 24. Composiciones de la fundición nodular para cada probeta de análisis espectrométrico	97
Tabla 25. Análisis de costos	102

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A	105
ANEXO B	106
ANEXO C	107

INTRODUCCIÓN

Se ha visto la importancia de la aplicación de los conocimientos teóricos adquiridos por el estudiante en apoyo a la industria para mejorar y controlar los procesos, así como también dar una base teórica que fundamente las prácticas empíricas que se llevan a cabo.

Para ofrecer un buen producto es necesario cumplir con ciertas especificaciones técnicas, lo que hace necesario realizar un control durante todos los procesos que intervienen en su fabricación. Estos controles deben cumplir con parámetros especificados en normas ya establecidas para garantizar la reproducibilidad de los datos obtenidos.

En el caso de la producción de hierro nodular algunos de los controles aplicados son: el análisis de composición química del hierro, la temperatura del metal base antes de hacer el tratamiento de inoculación, propiedades mecánicas, ensayo de cuña, entre otros, por medio de los cuales se puede controlar el proceso disminuyendo las pérdidas de metal por baja calidad.

Fundiciones de Metales De Lima Ltda., cuenta con una serie de controles aplicados en el proceso de fabricación de piezas en fundición nodular, sin embargo, estos controles pueden estar sujetos a mejoras, y en algunos casos se pueden proponer nuevos ensayos que complementen los ya existentes.

En el presente trabajo se realizó la caracterización, diagnóstico y propuesta de nuevos ensayos con los que se buscó mejorar la calidad de la fundición nodular obtenida en la empresa.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 CONTROL DE LA ARENA EN VERDE

Existen una variedad de pruebas de laboratorio de arena para auxiliar a los operadores y al personal de control de calidad en la eliminación de los problemas de calidad asociados con vaciado y moldeo.

La humedad, por ejemplo, es un aditivo de la arena extremadamente crítico que puede impactar grandemente la calidad de los vaciados y la operación del equipo para preparación de arenas. La prueba de compactabilidad es el mejor método para controlar las adiciones de agua en el molino. La adición de agua variará, puesto que la cantidad de agua agregada a la arena es una función de las variables de composición y proceso.

Controlar la compactabilidad cuenta para los cambios ligeros en la composición de la arena y asegura que se efectúe la correcta adhesión de agua para alcanzar propiedades de moldeo constantes. Si la cantidad de agua cambia drásticamente para mantener un valor meta de compactabilidad, podría indicar que otro componente de la arena se ha salido de control, un equipo de compactabilidad se muestra en la figura 1.

En cuanto al tamaño y distribución de los granos de arena son en extremo importantes para controlar el acabado superficial de las piezas. Estas características también afectan la habilidad del molde para apoyar la evacuación de gases formados durante la transformación de agua a vapor y la descomposición de los constituyentes orgánicos de los aglutinantes de los corazones y los aditivos de la arena verde.



Fig. 1. Compactadora típica de arena con sus partes indicadas.

La correcta distribución de la arena es también crítica para reducir la ocurrencia de defectos por expansión de arena.

La arcilla es el adhesivo que mantiene la forma del molde a temperaturas tanto ambientes como elevadas. La adición de agua se requiere para activar la arcilla. El contenido de humedad del sistema es extremadamente crítico y puede afectar casi todas las propiedades físicas que son medidas en fundición. Los problemas de vaciado y moldeo relacionados con la arena podrían ser causados por un exceso o deficiencia de humedad.

Cambiar la cantidad total de arcilla y agua puede alterar la resistencia a la compresión de la arena en verde, la permeabilidad y otras propiedades físicas. Generalmente, un porcentaje más alto de arcilla, hasta un 12%, traerá como resultado aumento en la resistencia. La cantidad de agua puede también tener un gran efecto en la resistencia a la compresión en verde, en seco y en caliente.

Generalmente, incrementando el agua se incrementa la resistencia a la compresión en verde hasta un punto, referido como el punto templado, incrementos adicionales de agua traerán como resultado un decremento en la resistencia a la compresión en verde.

Ambas resistencias a la compresión, en seco y en caliente, muestran un incremento en la resistencia con el incremento de la humedad en un rango normal.

Un molde de arena en verde debe resistir la temperatura de vaciado de la aleación fundida, si el contenido de sílice de la arena del sistema se reduce a un nivel crítico, el acabado superficial de los vaciados de aleaciones de altas temperaturas de vaciado puede deteriorarse debido a la pérdida de capacidad refractaria, ya que con la disminución del contenido de sílice el punto de fusión de la arena también se reduce.

Una forma de mantener constante la capacidad refractaria de la arena es adicionar arena nueva en el sistema para reponer el contenido de sílice y drenar las cantidades excesivas de cenizas, finos y arcilla destruida térmicamente.

1.1.1 Métodos de control de la arcilla

La prueba de azul de metileno determina el porcentaje de bentonita disponible en una muestra de arena. Esta prueba de laboratorio proporciona información crítica a cerca de las correctas adiciones de arcilla para mantener los niveles de esta entre los límites de control superior e inferior. A diferencia de la prueba de azul de

metileno, la prueba AFS de la arcilla es una prueba de laboratorio que indica el porcentaje total de material fino en la arena. Esto incluye materiales menores a 20micrones y/o materiales que sedimentan en el agua a una velocidad menor a 1pulg/min. Estos materiales incluyen la arcilla disponible, arcilla muerta, granos finos de arena, ceniza, coque, carbón y celulosa. Los porcentajes AFS de arcilla siempre serán más altos cuando se comparan a los del azul de metileno, debido a que contienen ambas bentonitas, disponible y térmicamente destruida, junto con cualquier otra partícula extremadamente fina.

Generalmente con forme el porcentaje de arcilla AFS se incrementa mientras el nivel de arcilla de azul de metileno permanece constante o disminuye, se requiere más agua para mantener una compactabilidad constante debido la un incremento en la superficie de contacto del sistema.

1.1.2 Mezclado de la arena

La función de un molino es activar la bentonita disponible dentro de la arena. Debido a que una mezcla de agua y arcilla es en extremo tenaz, el molino utiliza ruedas que incorporan fuerzas tanto de compresión como de corte para activar las partículas de bentonita y untar la macilla de bentonita sobre los granos de arena.

Las ruedas del molino son extremadamente importantes para generar las cargas apropiadas de compresión y corte requeridas para desarrollar plenamente las propiedades físicas de la arena de moldeo. Un completo conocimiento de la secuencia del ciclo de molienda debe ser mantenido para ayudar a minimizar el tiempo de ciclo y optimizar la efectividad del molino. Un incremento en la resistencia a la compresión en verde se dará de acuerdo a como está procediendo el proceso de molienda. Es en extremo importante reemplazar las piezas de desgaste tales como ruedas y arados y rutinariamente ajustar estos componentes

a los ajustes recomendados para maximizar su desempeño y minimizar su desgaste.

1.1.3 Recirculación de la arena

La arena verde esta siempre en un estado de trabajo ya sea que se encuentre en el proceso de enfriamiento, molienda, moldeo, en espera del proceso de solidificación de vaciados ó templándose en un silo de arena de retorno. El hecho de que la arena verde es constantemente reciclada con pequeñas adiciones de materias primas es una de sus ventajas inherentes. Sin embargo, para conocer y controlar un sistema de arena verde, existen ciertos cambios que deben ser entendidos cuando la temperatura de la arena es elevada durante el proceso de vaciado y enfriamiento de piezas dentro del molde.

Primero, el agua es removida en forma de vapor. Si la temperatura de la arena es elevada arriba de 100°C el agua libre en la superficie es removida. La cantidad de agua libre removida puede ser estimada por el contenido de humedad determinado en el laboratorio de arenas. Este cambio es reversible. Si la adición de calor fuera detenida en un punto debajo de aproximadamente 316°C una adición de agua y molienda podría restituir la mezcla de arena-arcilla a las propiedades normales de trabajo.

Segundo, a temperaturas mayores de 316°C para la bentonita cálcica y 648°C para la bentonita sódica, el agua combinada químicamente es removida de la estructura enrejada de la bentonita. Esta etapa es irreversible y la fuerza aglutinante de la bentonita se pierde. Cuando secciones de arena de moldeo alcanzan estas temperaturas, las bentonitas contenidas en estas áreas son térmicamente destruidas y son algunas veces llamadas arcilla muerta.

Una cierta cantidad de bentonita nueva debe ser agregada después de cada ciclo del sistema para reemplazar la bentonita destruida térmicamente. Aún más, arcilla adicional debe ser agregada para cubrir la arena proveniente de los corazones, así como para reemplazar las pérdidas por colección de polvos y las pérdidas naturales.

En la figura 2 se presenta un esquema de recirculación de arena en una fundición.

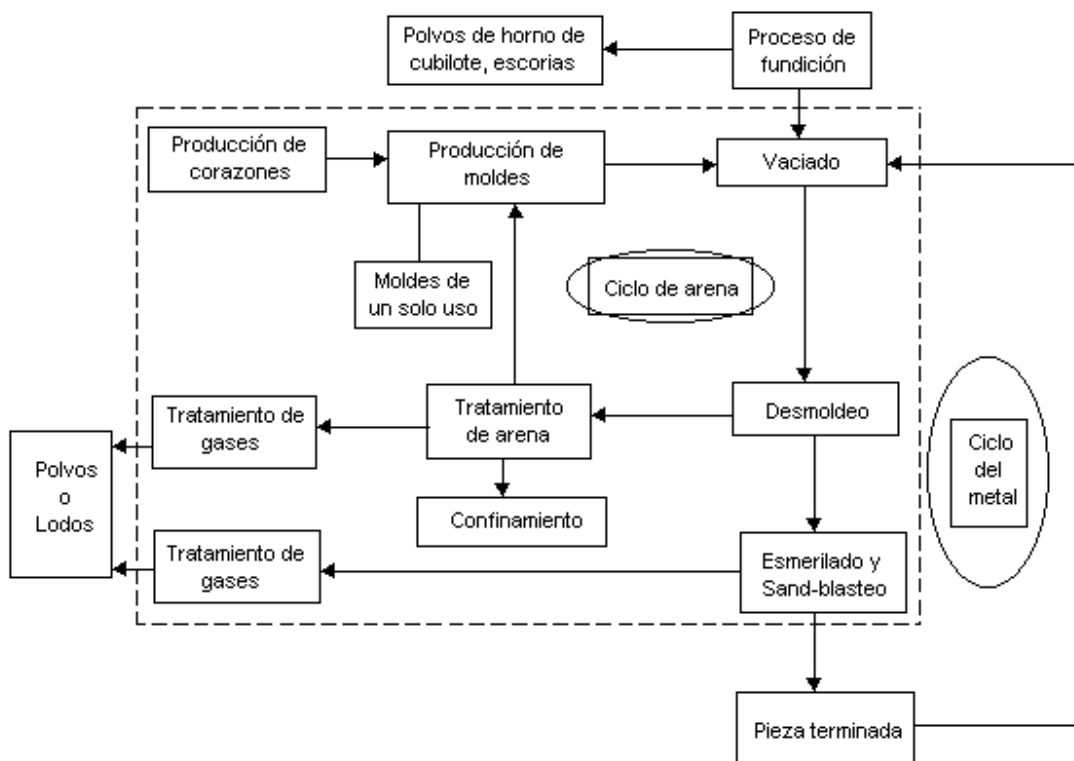


Figura 2. Presentación esquemática del ciclo de arena de fundición

1.2 FUNDICION NODULAR

Este tipo de fundición denominada también dúctil, o esferoidal, se caracteriza por que en ella el grafito aparece en forma de esferas o de glóbulos minúsculos. Al encontrarse el grafito en forma esferoidal, la continuidad de la matriz se interrumpe mucho menos que cuando se encuentra en forma laminar; esto da lugar a una

resistencia a la tracción y tenacidad mayores que la fundición gris ordinaria. La fundición nodular se diferencia de la fundición maleable en que normalmente se obtiene en bruto de colada sin necesidad de tratamiento térmico posterior. El contenido total de carbono de la fundición nodular es igual al de la fundición gris. Las partículas esferoidales de grafito se forman durante la solidificación debido a la presencia de pequeñas cantidades de Magnesio o Cerio, las cuales se adicionan al caldero antes de colar el metal a los moldes. La cantidad de ferrita presente en la matriz depende de la composición y de la velocidad de enfriamiento. Las fundiciones perlíticas presentan mayor resistencia pero menor ductilidad y maquinabilidad que las ferríticas.

Proceso de esferoidización e inoculación

Para conseguir la cristalización del grafito en forma esferoidal la fundición líquida debe ser sometida a dos tratamientos consecutivos:

1. Tratamiento de esferoidización.
2. Tratamiento de inoculación.

El primero consiste en añadir a la fundición líquida una aleación o producto que contenga un elemento esferoidizante. Que por cierto son bastante limitados y entre ellos se encuentran los siguientes: Magnesio, Calcio, Titanio, Cromo, pero en la industria solo el Magnesio y el Calcio son tenidos en cuenta, y estos elementos son acompañados por otros que sirven como portadores conformando la aleación deseada.

En cuanto al segundo proceso (inoculación) consiste en someter la fundición esferoidizada a un tratamiento especial con el fin de evitar que pase parcial o totalmente a fundición blanca e impedir que los nódulos se disuelvan en el baño metálico fundido desvaneciéndose la acción esferoidizante del Magnesio. Este proceso se realiza cada vez que el metal sale del horno en el chorro o en la

cuchara los inoculantes más empleados son: ferrosilicio (FeSi), el FeSiCr, el silicato de calcio, etc.

1.2.1 Principales elementos constituyentes de la fundición esferoidal

Dentro de los factores más importantes a tener en cuenta en una eficiente nodulización podemos considerar como el más importante la composición del baño a inocular el cual debe reunir requisitos muy estrictos en lo que concierne al contenido de azufre y elementos trazas, tales como, Bi, Sb, As, etc., que son perjudiciales en la esferoidización. Dentro de los principales elementos se encuentran los siguientes:

Carbono

El contenido de carbono para hierro esferoidales varía entre 3 y 4.3%. Siendo el carbono la base para la formación de esferoides de grafito, a mayor cantidad de carbono corresponderá la formación de un mayor número de esferoides, aunque no debe sobrepasar ciertos límites por encima de los cuales se puede presentar la flotación del carbono. Este fenómeno se presenta debido a que la densidad del grafito es menor que la del hierro, lo que hace que los nódulos floten segregándose en la parte superior de la pieza.

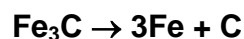
Azufre

Es necesario que antes de efectuar el tratamiento con esferoidizantes bajar el contenido de Azufre al orden del 0.02%. Cuando se adiciona Magnesio a un baño alto en Azufre se producen formas de grafito interdendrítico y laminas en rosetas. La necesidad primordial de reducir el Azufre a porcentajes tan bajos radica en la gran afinidad entre este elemento y el Magnesio dado que este último se utiliza como esferoidizante para formar sulfuros estables, (MgS). Si el contenido de Azufre es muy alto durante la inoculación gran parte del Magnesio irá a la escoria en forma de sulfuro. El Azufre ejerce un efecto antiesferoidizante cuando supera

cierto límite en composición; ya que el Azufre y el Oxígeno disueltos en el hierro inhiben la nucleación. Se puede afirmar, además, que el Azufre previene la formación de carburos debido principalmente a la estrecha relación entre Carbono y Silicio, evitando la formación de Fe_3C (cementita).

Silicio

El rango normal del silicio en el hierro esferoidal oscila entre 1.3 y 3.0%, debido a que el Silicio afecta al Carbono Equivalente, también afecta el número de esferoides y la flotación del grafito, el incremento del porcentaje de silicio desplaza en eutéctico hacia la izquierda. Cuando se enfría una aleación hipoeutéctica fundida, se precipitan dendritas de austenita hasta que se llega a la temperatura eutéctica, el líquido restante puede solidificar como eutéctico metaestable de austenita y cementita, o como un eutéctico estable de austenita y grafito. Un Silicio alto trae consigo la formación directa del grafito del producto estable. El Silicio también trae consigo, en el hierro solidificado, la descomposición de cementita sólida de acuerdo a la reacción:



Ya sea durante la solidificación normal en el molde o por medio de un tratamiento térmico posterior. Esto puede aplicarse tanto a carburos perlíticos o eutectoides como a carburos eutécticos.

En la producción de hierro esferoidal es indispensable la inoculación que sigue al tratamiento con Magnesio pero se ha podido observar una excelente grafitización sin necesidad de inocular si se emplea una aleación de Mg-ferrosilicio, siempre y cuando el tiempo transcurrido entre el tratamiento y la colada en el molde no se prolongue demasiado, pues con el tiempo se redisuelven los nódulos en el baño, desvaneciéndose la acción nodulizante del Mg. En los casos en que el volumen del metal fundido es considerable se hace la adición de ferrosilicio, con el fin de

provocar la vida del nódulo; cada vez que el metal se pase de una cuchara a otra se realiza esta misma acción agregándole al chorro o en el fondo de la cuchara.

Manganeso

Este es un elemento antigrafitizante, el contenido de este en el hierro esferoidal es de 0.3 a 0.5%, a menos que se desee obtener una matriz completamente ferrítica, en cuyo caso este elemento debe utilizarse a muy bajo nivel. Cuando se desea una matriz perlítica, este elemento puede estar en cantidades que excedan el límite superior.

Se debe anotar el hecho de que siendo el manganeso un fuerte estabilizador de carburos, influye también sobre el tamaño del esferoide impidiendo su crecimiento al disminuir la difusión de carbono hacia los nódulos.

Fósforo

El fósforo no afecta ni la forma ni el tamaño de la fundición esferoidal, pero si puede provocar porosidades si se encuentra en exceso, debiéndose limitar su contenido por el incremento del Carbono y del Silicio, afectando el carbono equivalente.

$$\%CE = \%C + \frac{(\%Si + \%P)}{3}$$

El aumento de la porosidad se explica por el aumento del eutéctico fosforoso, de modo que este es el último en solidificar, produciendo la formación de microporosidades en los cristales, en las proximidades a las zonas eutécticas. En la fundición esferoidal esta actitud a la porosidad es muy marcada, ya que la contracción debida a la solidificación eutéctica es característica de la fundición esferoidal.

Magnesio

Es el responsable de la esferoidización del grafito en los hierros hipo e hipereutéticos, es un poderoso desulfurante y desoxidante. Si el contenido de O₂ y/o de Azufre en el baño es muy alto, una cantidad apreciable de Magnesio se consumirá en la formación de óxidos y sulfuros de Magnesio.

Las teorías hasta el momento estudiadas dan por hecho que el Magnesio es el centro de nucleación y que produce dicha nucleación en forma esferoidal. Una de las teorías más aceptadas propone que existe una caída en el potencial de ionización de átomos de Magnesio lo que acompañado a la alta afinidad que existe en este estado entre el Magnesio y el Carbono, y a la alta temperatura del baño, conduce a una interacción donador-receptor entre átomos de Carbono y Magnesio, con la formación del complejo Mg⁺-C⁻. Este servirá como núcleo o punto de partida para que el grafito se reúna a su alrededor, de esta manera la célula crece y forma un nódulo, esto explica en cierta forma la alta concentración en el centro de estos nódulos.

La cantidad de Magnesio a adicionar en el baño debe ser bien dosificada para evitar formas indeseadas de grafito y variaciones imprevistas en la matriz; pues se sabe que el *Magnesio residual* (Magnesio total agregado como aleación menos el consumido en el proceso de desulfuración y desoxidación) en exceso actúa como un estabilizador de carburos, promoviendo la formación de carburos primarios en piezas de sección delgada o restringiendo la formación de estructura ferrítica en piezas de sección gruesa.

Además, los contenidos excesivos de Magnesio residual tienden a formar espumas y escorias con la consecuencia de poros en las piezas fundidas, el contenido de Magnesio residual oscila entre 0.05 y 0.08%, aunque existen otras teorías que afirman que la cantidad óptima está entre 0.03 y 0.06%. Hay que tener en cuenta, además, que el rendimiento del Magnesio no es del 100%, este

depende de la temperatura del baño, del proceso empleado y de la concentración del Magnesio en la aleación. A continuación se presenta una tabla donde se muestra como varia el rendimiento para diferentes porcentajes de Mg.

Tabla 1. Variación del rendimiento para diferentes porcentajes de Mg

RENDIMIENTO A DIFERENTES PORCENTAJES	
% de Mg en aleación	Rendimiento
Mg puro	0
50	10 – 25
8 – 12	20 – 40
4 – 8	40 – 60

Teniendo en cuenta todo lo anteriormente dicho, la cantidad de ferroaleación total a adicionar se puede determinar por medio de la fórmula siguiente:

$$KgFerroaleación = M * \left[\frac{0.75 * (S_i - S_f) + Mg_r + (t * 0.001)}{(R * \%Mg_L) / 100} \right] * \left(\frac{T}{1450} \right)^2 \quad (1)$$

Donde:

M = Kg. de metal a tratar

S_i = Azufre del metal base

S_f = Azufre final

Mg_r = Magnesio residual esperado

t = Tiempo de colada (min.)

$\%Mg_L$ = Porcentaje de magnesio en la ferroaleación

T = Temperatura del tratamiento °C

R = Rendimiento de la ferroaleación

Hay que tener en cuenta también que la proporción de Magnesio residual decae con el tiempo en la fundición líquida, debido esto principalmente a la afinidad del Magnesio con el Azufre. De modo que una pieza que deba colarse 10 minutos después del tratamiento debe contener más Magnesio residual que una que ha de colarse inmediatamente después del tratamiento.

Otro aspecto que hay que tener muy presente es el punto de fusión del Magnesio, que es de 1100°C aproximadamente, en la zona de temperatura de fusión de la fundición de hierro, es decir, en la zona de 1200 a 1500°C; donde el Magnesio desarrolla una presión de vapor alta y peligrosa desde el punto vista operativo y que por lo tanto hay que controlar.

El Magnesio se pone en contacto con el hierro de acuerdo al proceso que se ha de desarrollar, pero la cantidad en que este elemento se adiciona influye en la forma del grafito de la siguiente manera: Si la cantidad de Magnesio es insuficiente se promueve la formación de grafito laminar o interdendrítico, con presencia de algunos nódulos en forma esporádica. Al aumentar el porcentaje de Magnesio residual se aumenta de igual forma la producción de nódulos y aparecen a veces formas muy variadas de grafito, tales como rosetas, láminas, etc. Cuando el Magnesio residual se encuentra en cantidades muy altas (por encima de 0.18%) ocasiona la aparición de grafito en forma de espiga, diseminado entre los nódulos deformados. Cuando el Magnesio residual se encuentra en la proporción adecuada se presenta solo grafito en forma nodular y la presencia de otras formas de grafito es casi nula.

Cromo

Es un elemento promotor de carburos que es agregado para lograr una buena resistencia a la tracción y al desgaste, al calor, y a la corrosión. Sin embargo, promueve la formación de carburos libres lo que representa su principal

desventaja y cuyo efecto se ve neutralizado por la adición de elementos grafitizantes al momento que se vaya a adicionar este.

La adición de cromo se puede realizar directamente en la cuchara cuando se va agregar en proporciones bajas. Agregando el Cromo en porcentajes de 0.1-0.2% se afina la perlita y el grafito en las fundiciones. Para 1% se logra una gran cantidad de carburos diseminados obteniendo así una fundición de alta dureza y una matriz estable a altas temperaturas, cuando se agrega hasta 0.5% combinado con 0.2% de Estaño se logra una alta estabilidad de la perlita a altas temperaturas y durante un tiempo apreciable.

Cobre

Este produce un endurecimiento de la ferrita que es considerado como un efecto directo, pues, además, causa indirectamente la grafitización de la fundición durante la solidificación en un término medio en comparación con el Silicio, el Cobre influye negativamente en la velocidad de crecimiento del grafito tanto así que en altas proporciones (3.2%) destruye completamente los esferolitos.

Estaño

La adición de este elemento tiene un gran efecto de la estabilidad y formación de la perlita, ya que por ejemplo un hierro cuya matriz es ferrítica sin estaño puede transformarse a perlítica con adiciones de pequeñas cantidades de este. La formación de la perlita como matriz acarrea cambios considerables en las propiedades mecánicas. La adición de Estaño puede causar un efecto nocivo en la formación de nódulos, esto se puede neutralizar con la adición de Cerio. Así por ejemplo para la neutralizar el efecto nocivo en la nodulización de 0.37% de Estaño se requiere 0.6% de Cerio.

Níquel

Durante la solidificación este elemento actúa como un grafitizante, pero en menor grado que el Cobre y en el proceso de enfriamiento es un antiferritizante de menor poder, tendiendo a formar diferentes estructuras según el porcentaje en que se agregue, así por ejemplo, con adiciones de hasta 2% se obtiene una estructura perlítica y con adiciones de 4-8% se obtiene una estructura martensítica y con adiciones del 20% se obtiene una estructura austenítica.

1.2.2 Fabricación de la fundición esferoidal

La desoxidación del caldo es una condición inexcusable para que se formen los esferoides que durante la cristalización aparecen al desprenderse el carbono del hierro. La desoxidación se consigue perfectamente con ayuda del magnesio, no habiéndose en la práctica otro medio que permita obtener más económicamente resultados igualmente satisfactorios y al mismo tiempo también la esferoidización. Con toda probabilidad la desoxidación del hierro líquido es absolutamente necesaria, pero no basta para que en una fundición hipoeutéctica, eutéctica o hipereutéctica se forme grafito esferoidal. Asimismo se sabe que otros elementos, como por ejemplo, Plomo o Bismuto, ocasionalmente impurifican la fundición, impiden la formación de los esferoides incluso en la presencia de suficiente Magnesio, y que esta interferencia se puede eliminar por adición de metales de tierras raras. Estos principios son conocidos por los productores de grafito esferoidal y consecuentemente aplicados en la práctica, por cuanto para fabricar la esferoidal se emplean cargas, por ejemplo de arrabio y chatarra de acero, que satisfacen estos requisitos.

En la práctica es muy importante que el material de carga contenga la menor cantidad posible de Azufre, ya que el Magnesio tiene gran afinidad no solamente con el Oxígeno, sino también con el Azufre y, por lo tanto al combinarse con éste último, no se dispondrá de Magnesio necesario para la desoxidación del hierro

colado y eventualmente para otros fines. Un contenido, lo más bajo posible, de Azufre en la fundición líquida para elaborar la fundición esferoidal es también de gran importancia práctica, por cuanto tras el tratamiento metalúrgico ha de desescoriarse el caldo, es decir, separar la escoria de la combinación Magnesio-Azufre y Magnesio-Oxígeno.

La experiencia demuestra que el bajo contenido de Azufre permite escoriar hasta el máximo posible. Los productos de reacción (sulfuros, óxidos y también silicatos) dificultan el llenado de moldes, perjudican la calidad de las piezas fundidas y pueden llegar a afectar las propiedades del material colado hasta el extremo de hacer inutilizable la pieza si antes de que solidifique el caldo no se consigue la separación de aquéllos.

La fundición esferoidal se obtiene por fusión de lingote de hierro especial, junto con una porción de retornos y chatarra de acero, casi exclusivamente en hornos eléctricos de inducción o cubilotes de viento caliente. La temperatura de sangrado del hierro debe ser de 1500°C o superior, a fin de poder compensar la pérdida de temperatura que sobreviene en el tratamiento de Magnesio y garantizar altas temperaturas de colada.

Para la fusión en cubilotes es indispensable disponer de coque de muy bajo azufre y buen poder calorífico. Se puede lograr un aumento considerable en la temperatura del metal en el pico de colada mediante el empleo de carburo de calcio como fundente en sustitución de la caliza, añadiéndose fluorita para darle fluidez a la escoria. En el caso de cubilote ácido, es indispensable efectuar una desulfuración en la cuchara, previa a la inoculación con Magnesio por lo que se necesita una temperatura suficientemente alta. Esta desulfuración suele hacerse con carbonato de sodio, carburo de calcio ó caliza, siendo más efectivo el tratamiento con los dos primeros.

La producción mediante el horno eléctrico es más fácil de controlar, debido a que no hay adiciones de azufre, su contenido no es otro que el de la materia prima, Además, el control de temperatura se puede llevar a cabo de manera más precisa, se puede recalentar el baño después de las pérdidas de temperatura debido a la inoculación y a la desulfuración.

Antes de sangrar el hierro se cuela una probeta en forma de cuña, que se enfría bruscamente y se rompe de un golpe, a fin de poder enjuiciar por el aspecto de la fractura de la cuña la composición y el estado del caldo, también por el blanqueo del vértice de la cuña el contenido de Silicio y Carbono del hierro líquido. Por otra parte, del mismo Hierro base se cuela una probeta en arena para análisis, que se enfría normalmente y en consecuencia se muestra una fractura gris. Esta probeta se maquina para sacar virutas que sirven para la determinación analítica rutinaria por vía húmeda de los restantes componentes de las aleaciones Hierro-carbono, como Silicio, Manganeso, Fósforo y Azufre.

El tratamiento con Magnesio del caldo se efectúa con una aleación, añadida en una cantidad que depende del contenido de Azufre del Hierro, del método de adición y de la temperatura del tratamiento. Dado que durante el proceso de colada se produce cierta pérdida de Magnesio, se utiliza la última probeta, casi siempre para análisis espectrométrico para la determinación del Magnesio y otros elementos.

Para determinar los constituyentes usuales de la fundición con grafito esferoidal, aparte del carbono se puede recurrir a una probeta colada en arena de solidificación gris. Los métodos de análisis por vía húmeda están siendo desplazados por electroquímicos, los cuales permiten una rápida determinación de la composición química del hierro base y hace posible, entre otras cosas, realizar correcciones del caldo.

1.2.3 Procedimientos usados en los tratamientos esferoidizantes

Aleaciones esferoidizantes

Como ya se ha mencionado anteriormente los elementos esferoidizantes son el Magnesio y en menor proporción el Calcio. El Magnesio (más utilizado) tiene un punto de fusión de 1350°C aproximadamente y una presión de vapor de 10 atmósferas por lo que la adición de Magnesio es explosiva cuando se agrega solo este elemento, por lo que generalmente va acompañado de elementos pesados tales como el Silicio, el Hierro, el Cobre o el Níquel, reduciendo la presión de vapor considerablemente, dentro de las aleaciones más utilizadas se encuentran las siguientes:

Tabla 2. Principales aleaciones esferoidizantes

ALEACIONES ESFEROIDIZANTES					
Aleaciones	Magnesio	%Silicio	%Níquel	%Calcio	%Hierro
TIPO 1	15		85		
TIPO 2	5	15		2	RESTO
TIPO 3	10	45		2	RESTO
TIPO 4	15	30	55		
TIPO 5	10	65		6	RESTO
TIPO 6	15	50		4	RESTO
TIPO 7	18	65		2	RESTO
TIPO 8	30	60		4	RESTO

Los procedimientos para la fabricación de la fundición esferoidal son numerosos pero en general pueden ser clasificados en tres grupos, según la naturaleza de las fundiciones tratadas.

1.2.3.1 Procedimiento de la fundición con tratamiento de magnesio puro

Como se ha mencionado anteriormente la adición de Magnesio puro a la fundición líquida es muy peligroso y requiere técnicas especiales, debido a la evaporación

explosiva del Magnesio a temperatura normal de fundición. Este fenómeno disminuye el rendimiento del Magnesio como esferoidizante, para aumentarlo se recomienda adicionarlo bajo presión gaseosa elevada, con lo que se logra que la temperatura de ebullición del Magnesio ascienda más que la temperatura de la fundición líquida, este procedimiento se utiliza en la cámara de presión y en la cuchara de presión, en la primera se procede en este orden, se cierra, se introduce en el recipiente gas a alta presión. Seguidamente se introduce el magnesio en la fundición. En la cuchara de presión, la elevada presión se consigue por evaporación de Magnesio, por este motivo, la cuchara adopta una forma especial, y el espacio libre de la parte superior del baño es relativamente pequeño.

1.2.3.2. Métodos de tratamiento de la fundición con aleaciones de escasa densidad

Se trata de aleaciones de Silicio o ferrosilicio con 5-35% de Magnesio que son mucho más económicas que las del tipo Níquel-Magnesio pero con menor peso específico. El procedimiento a seguir es el siguiente, se depositan en el fondo de la cuchara sobrenadando fácilmente en la fundición cuando se llena aquella, proviniendo una reacción en superficie insuficiente y variable, para obtener un resultado eficiente con estas aleaciones es necesario emplear técnicas apropiadas. Otra técnica consiste en la inmersión de la aleación contenida en una campana de material refractario ó de grafito. La campana esta unida a una pesada capa que cubre la cuchara durante el tratamiento, para impedir las proyecciones de metal resultante de la reacción violenta; que para aleaciones con 5-10% de Magnesio resulta un poco violenta por lo que se puede depositar en el fondo de la cuchara. Actualmente se utilizan tres técnicas diferentes.

La primera consiste en depositar la aleación en el fondo y en un lado de la cuchara y cubrirla con desperdicios de chapa de acero, que va siendo cubierta con la

fundición a medida que se llena la cuchara por el lado opuesto. Otro método es el denominado Sándwich, la aleación se deposita en una cavidad en el fondo de la cuchara y se tapa con chapas de acero. Al ser llenada la cuchara por la parte superior del fondo se va cubriendo la aleación con fundición líquida. Un nuevo método denominado "Triggerr method" la aleación se deposita en una cavidad en el fondo de la cuchara se cubre con una capa de carburo de calcio de granulometría 0.3-0.7mm. Al contacto de la fundición líquida el carburo se vitrifica y forma una corteza sólida una vez llenada la cuchara, la corteza es perforada por un vástago de acero iniciándose así, una reacción moderada.

1.2.3.3 Método de la fundición con aleaciones pesadas

Las aleaciones pesadas en base de Níquel o de Cobre presentan la ventaja de un empleo más sencillo que las aleaciones de baja densidad, pero tienen como principal inconveniente su alto costo. Estas aleaciones pueden depositarse en el fondo de la cuchara sin precauciones especiales o incluso vertirse en la cuchara después de llenada esta. Estas aleaciones son empleadas en las fundiciones inglesas productoras de fundición esferoidal que utilizan aleación Ni-Mg.

1.2.4 Dificultades de producción de la fundición esferoidal

Dentro de estas dificultades se pueden presentar en primer lugar los factores que pueden influenciar en el grado de esferoidización de la fundición y en segundo lugar se pueden considerar los defectos que pueden presentarse en las piezas de fundición esferoidal.

Dentro de los factores del primer tipo cabe destacar lo siguiente:

1. Variación del contenido de azufre de la fundición de base

Según las materias empleadas y el procedimiento de elaboración el contenido de azufre de la fundición de base y por lo tanto el contenido de Magnesio residual

después del tratamiento puede variar. Una disminución del contenido de azufre no ejercerá, por lo general, influencia notable, pero en el caso contrario un aumento sensible del contenido de azufre, puede originar un contenido muy bajo de Magnesio residual, lo que ocasionaría una esferoidización imperfecta.

2. Variación del contenido del Magnesio residual

El rendimiento de incorporación del Magnesio depende de la temperatura de tratamiento, por lo tanto, puede influenciar considerablemente al Magnesio residual. Si la temperatura de la fundición es baja puede resultar una fundición con Magnesio residual alto, lo que acarrea una fragilidad del metal. Si la temperatura es muy elevada el Magnesio residual resultaría insuficiente por lo tanto se presentaría una esferoidización insuficiente. Si transcurre mucho tiempo entre el tratamiento y la colada el contenido de Magnesio residual disminuye y también el efecto de la inoculación, por lo que resultará una fundición con tendencia a la fragilidad y con una disminución del potencial de esferoidización.

3. Influencia de las trazas de elementos

Algunos elementos como el Antimonio, el Bismuto, el Plomo, etc., ejercen una influencia excesivamente nefasta sobre la formación de los esferoides y pueden impedir esta totalmente o parcialmente a partir de unas milésimas de porcentaje. La adición de tierras raras incorporadas a la aleación nodulizante o por separado, permite neutralizar la influencia de trazas perjudiciales, siempre que la proporción no rebase un valor límite, que se fija en 0.014% para el Plomo, 0.06% de Bismuto y 0.015% del Antimonio.

Se consideran ahora los defectos que puedan presentarse en las piezas de fundición esferoidal dentro de los cuales se pueden formar los siguientes:

1. Formación de picaduras

Estas se presentan en piezas relativamente delgadas y no se presentan, prácticamente en las masivas. Se ha investigado que las picaduras aparecen cuando el valor de Aluminio residual alcanza un valor crítico, que se encuentra entre 0.01-0.02%, según la naturaleza de la arena, la forma de la pieza, la temperatura de colada, etc. Por debajo o por encima de este valor las picaduras no se forman, por lo que la adición de Aluminio entre 0.1-0.2% las hace desaparecer.

2. Rechupes

La contracción volumétrica de esta fundición es del 6%, frente al 2% de la fundición laminar. Las piezas de fundición esferoidal, son por lo tanto, más sensibles a la formación de rechupes por lo tanto se necesitan mazarotas, enfriadores, para eliminarlos.

3. Carburos axiales

Se trata de un efecto de temple inverso, que provoca la penetración de los carburos en ejes de piezas redondas como cigüeñales y árboles de levas. Este fenómeno se remedia en parte con la disminución de Manganeso y de Magnesio o por la inoculación masiva; pero es el tratamiento térmico el que permite eliminar con certeza los carburos.

1.2.5 Propiedades de las fundiciones dúctiles

Las fundiciones dúctiles presentan en ciertos casos propiedades comparables con las de los aceros, por ejemplo el modulo de elasticidad, que puede alcanzar valores de hasta 17500 Kg/mm² cuando se encuentra en estado recocido; presentan, además, valores de resiliencia y porcentaje de elongación muy por encima de las fundiciones pero por debajo de los aceros.

Los valores de límite de elasticidad varían entre un 65 y un 85% de la última carga de acuerdo al tratamiento que se le realice a la fundición después de la inoculación. Cuando la fundición es empleada en estado bruto de colada presenta una resistencia a la tracción de aproximadamente unos 70 Kg/mm² y un 3% de alargamiento.

Cuando se desea una relativamente buena dureza y una aceptable ductilidad se recomienda utilizar fundiciones esferoidales que hayan sido sometidas a normalizado y revenido o bien a temple y revenido ya que se pueden obtener por medio de estos tratamientos resistencias a la tracción que varían entre 80 y 90 Kg/mm² y porcentajes de alargamiento entre 1.5 y 2.0%. Conviene destacar la influencia del espesor sobre los resultados que se desean obtener, cuando se fabrican piezas delgadas se debe adicionar mayor cantidad de silicio, para evitar la formación de fundición blanca o bien en caso extremo utilizar elementos de aleación.

La presencia de grafito contribuye al mejoramiento de la maquinabilidad que es similar a la de las fundiciones grises y superior a la de los aceros que presentan durezas similares. La fundición dúctil tiene el punto de fusión más bajo que cualquier otra aleación hierro-carbono, debido esto a que su composición está muy cerca del punto eutéctico, por lo que presenta mejor colabilidad y mayor fluidez que otras aleaciones hierro-carbono, es de destacar entonces su uso con gran regularidad para fabricar piezas fundidas de formas complicadas. Debido al porcentaje de carbono equivalente relativamente alto (4.3 a 4.7%) se puede fabricar en hornos de cubilote en los que se obtenga la temperatura necesaria y que se realicen los debidos controles de composición.

1.2.6 Controles de la fusión en el cubilote

Durante la marcha del cubilote, es necesario efectuar controles antes y durante la fusión, para obtener cierta regularidad en la calidad de las fundiciones que se elaboran. Estos controles que en razón a la misma naturaleza del proceso, deben distinguirse por su rapidez, sencillez y economía, deben realizarse en cada fusión, y sus resultados evaluados por el responsable de la dirección de la operación del horno.

A continuación se indican aquellos que gracias a la sensibilidad de sus resultados y al interés que ellos revisten deberían normalmente ejecutarse:

- **Observación de las gotas de fundición en las toberas**

Es la operación que enseña, de la manera más rápida, las condiciones de marcha del cubilote. Para el cubilote clásico las primeras gotas de fundición la primeras gotas deben aparecer en las toberas entre los seis y los ocho minutos, después de iniciado el soplo.

La figura 3, ilustra las diferentes situaciones que pueden presentarse. Gotas más claras que el coque incandescente, pequeñas, redondas y numerosas; indican una fundición caliente y un funcionamiento adecuado del horno.

Los parámetros: altura de la cama de coque, porcentaje de coque entre carga y el caudal de aire, son los correctos figura 3.a. La figura 3.b.c.d., muestra los desarreglos que pueden presentarse con sus posibles causas.

Si las gotas siguen siendo pequeñas, numerosas pero más oscuras que el coque incandescente, o al menos no son tan brillantes, indican que la fundición no es muy caliente. Es posible que se esté trabajando con un exceso de coque entre

carga y el flujo de aire sea bajo para este porcentaje de coque. En este caso la producción horaria es baja, figura 3.b.

Las ilustraciones c y d muestran desarreglos más severos. Si al comienzo las gotas son claras, grandes y alargadas, y vienen acompañadas con chorros más oscuros que el coque incandescente, indica que la fundición aún está caliente pero tiene tendencia a oxidarse. Si esta situación continúa, el valor de la temperatura disminuirá y la oxidación de la fundición se incrementará. La cama de coque se consume por la presencia de un flujo de aire en exceso, figura 3.c.

La última ilustración de la figura indica un desarreglo de la fusión exagerado. La fundición saldrá fría y muy oxidada. Es necesario revisar todos los parámetros que regulan la fusión.

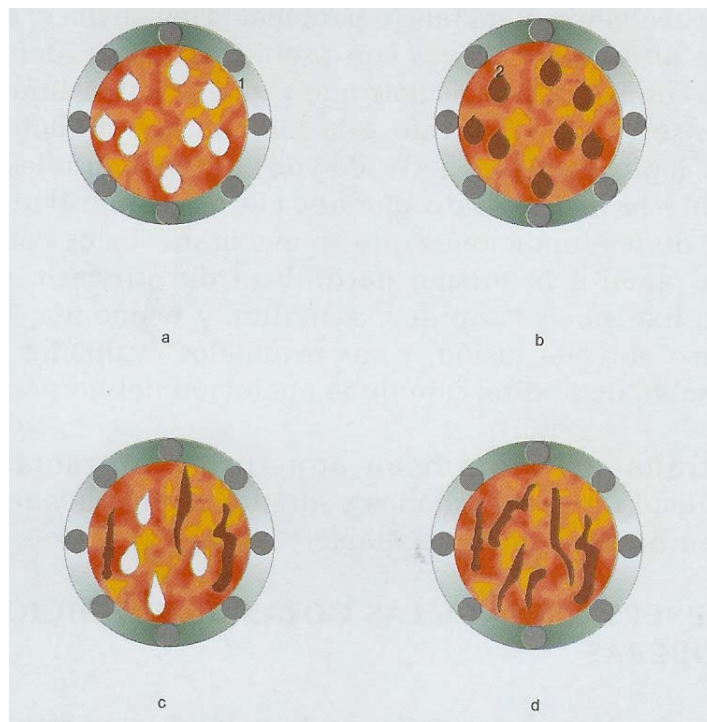


Figura 3. Observación de las gotas de fundición en las toberas

- **Medición de la temperatura de la fundición líquida en la piquera**

Es recomendable el empleo de pirómetros ópticos o de inmersión para conocer el valor de la temperatura de la fundición a la salida del cubilote. Sin embargo, la observación en el canal, a través de un vidrio coloreado permite juzgar el estado de la fundición líquida. Al no estar cubierta por escoria, la superficie del metal se oxida cuando se pone en contacto con el aire. Si se presenta en el centro del chorro una línea continua de óxidos, más brillante que la fundición líquida, la temperatura es normalmente superior a 1470°C. Además, se sabe que la fundición líquida se autodesoxida. Por debajo de los 1470°C el papel desoxidante lo cumple el silicio. A temperaturas superiores, el papel lo ejerce el carbono. Si se desprende un velo de humo del flujo del metal líquido, la fundición tiene muy seguramente una temperatura superior a los 1470°C. Estos humos indican desprendimiento de monóxido de carbono, el cual para su formación requiere de altas temperaturas.

Cuando la fundición no está caliente, se observan fenómenos que muestran que el metal está oxidado, como las siguientes manifestaciones:

- Aparición en el canal de chispas cortas, parecidas a fuegos artificiales.
- El flujo de metal líquido se cubre de un velo blanco tanto más viscoso cuanto más fría y más alta es la oxidación de la fundición.
- Ausencia de corrientes en la masa líquida de la fundición en la cuchara o en las mazarotas, producto de una oxidación superficial, tanto más vigorosa cuanto más caliente está el metal. Este fenómeno tiene relación, en especial, con el SiO_2 al ser reducido por el carbono.
- Colabilidad de la fundición reducida.
- Fractura anormal de la probeta de temple. La transición de zona gris a la blanca se hace de manera repentina.

Una fundición oxidada; es decir, una fundición fría, con frecuencia resulta de una cama de coque baja en presencia de un exceso de aire. La atenta observación de las gotas de la fundición en las toberas, permite conocer a tiempo esta anomalía para tomar las medidas del caso.

1.3 EL CUBILOTE

Se considera que para una mejor comprensión de la marcha del horno, es necesario conocer los fenómenos que en ella se suceden. En orden descendente y partiendo de la puerta de carga hasta la solera, se presentan las siguientes zonas:

- **Zona de precalentamiento**

Como su nombre lo indica en esta zona se calientan las cargas metálicas. El calentamiento se opera por el contacto con los gases calientes de la combustión que suben hacia la chimenea. La zona de precalentamiento se extiende desde el plano inferior de la puerta de carga hasta la zona de fusión.

Finalmente se habla de la existencia de una débil carburación, en especial de la chatarra de acero, por la presencia de CO y una muy pequeña sulfuración por la existencia de SO₂ en esta zona. Sin embargo, el poco tiempo de contacto que existe entre la chatarra y los gases de esta zona, hace que las reacciones sean prácticamente imperceptibles.

- **Zona de fusión**

La posición de esta zona en el cubilote depende en gran medida del diseño de la marcha. Ella se sitúa a la altura de la cama de coque. La zona de fusión limita en su extremo superior con la zona de precalentamiento y en su extremo inferior con la zona de gasificación del coque. Su espesor depende del porcentaje de acero en

la carga y/o del espesor de la chatarra. A medida que el porcentaje de acero en la carga aumenta y/o el espesor de los constituyentes se incrementa, más extensa es la zona de fusión. Es decir las cargas fundirán más abajo, lo cual trae como consecuencia una disminución de la temperatura de la fundición.

Generalmente se considera que la temperatura en la zona de fusión varía entre los 1200°C a 1500°C. Al llegar a esta zona la carga metálica se funde en pequeñas gotas que se deslizan sobre la superficie de los trozos de coque, aumentando su contenido en carbón y azufre. A medida que la carga metálica se funde; su espacio es ocupado por el material que está encima; y el coque que se gasta en la zona de combustión en fundir dicha carga es reemplazado por el coque entre carga. De esta manera, se busca que la altura de la cama de coque varíe lo menos posible.

- **Zona de gasificación del coque**

Su nombre se debe a que en ella se forma el CO producto de la reacción entre el CO₂ formado en la zona de combustión y el carbono del coque. Esta zona se sitúa entre la zona de fusión y el instante en el cual ya no hay oxígeno libre en el horno. La reacción de reducción del CO₂ es una reacción endotérmica. Al consumir calor, la temperatura en esta zona disminuye, pero como los trozos de coque están calientes, las gotitas de metal se calientan al deslizarse sobre ellos, absorbiendo al mismo tiempo carbono y azufre. Su supresión equivaldría a obtener una fundición altamente oxidada, con todas las consecuencias negativas que eso origina: poca colabilidad, alta sensibilidad al espesor, elevada susceptibilidad al temple, presencia de porosidades, sopladuras etc.

- **Zona de combustión o de oxidación**

Se define como la capa de coque que se extiende desde el plano superior de las toberas hasta el nivel en el cual el contenido de oxígeno es menor o igual a 1%. Es la zona en la cual se genera la energía para el desarrollo del proceso.

La combustión del coque en el cubilote depende de muchos factores: tamaño del coque, caudal de aire, velocidad del soplo en las toberas y la acción de sus efectos combinados. A mayor altura, más alto será el calor liberado en la combustión y más elevada será la temperatura de la fundición.

Existe un factor de diseño que tiene influencia en la forma y altura de la zona de combustión. Este factor es la inclinación de las toberas. La figura 4a.b.c. muestra el efecto de este parámetro junto con la influencia de la velocidad del aire.

Se observa que al aumentar la velocidad del soplo e inclinar la entrada del aire en el cubilote, aproximadamente 15% (8°), la zona de combustión se concentra, y la combustión tiende a realizarse en el centro del cubilote. Figura 4c. Si la velocidad del soplo es baja y las toberas son perpendiculares al eje longitudinal del cubilote, se originan corrientes de aire preferenciales, efectuándose la fusión cerca del refractario. El oxígeno no llega al centro de la zona de combustión, lo cual origina una zona central energéticamente muerta. Figura 4 a.

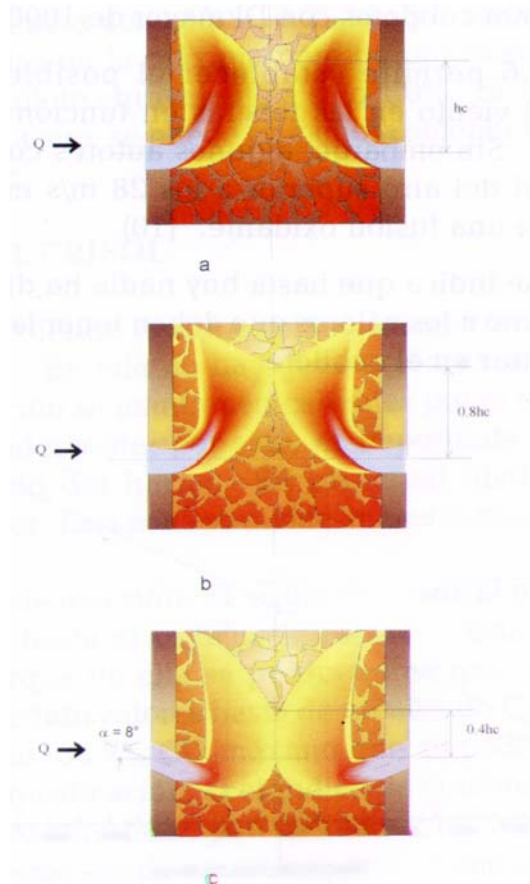


Figura 4. Efecto de la velocidad del aire y la inclinación de las toberas sobre la forma y altura de la zona de combustión

- **Zona del crisol**

Esta zona se extiende desde el plano inferior de las toberas hasta la solera. En ella no hay generación de energía. Las gotas de fundición se mantienen calientes por el contacto con el coque incandescente; por esto, es importante efectuar un buen encendido del horno. Su principal distintivo es su carácter reductor.

1.3.1 Toberas

Son los conductos que permiten la entrada de aire en el interior del cubilote. Para un determinado cubilote y un flujo de aire establecido, la velocidad del aire está determinada por la sección transversal de las toberas. Tiene sentido común pensar que la velocidad de entrada del soplo en las toberas, debe tener un valor que permite que el aire alcance el centro del horno, con el fin de crear una zona de combustión centralizada. Si la velocidad del soplo es baja, se va a presentar una zona de combustión periférica, creándose en el centro una zona energéticamente muerta. Si la velocidad es alta, la zona de oxidación será más amplia, lo cual aumenta las pérdidas por oxidación del silicio y del manganeso. Se menciona que a velocidad del soplo debe estar entre 12m/s a 28 m/s. Parece ser que una velocidad comprendida entre los 20m/s y los 24 m/s. es adecuada para los cubilotes con diámetros internos de 600 mm. a 1000 mm.

En cuanto al número de toberas este se establece considerando dos criterios: a distribución del soplo y la facilidad de mantenimiento. A mayor número de toberas se mejora la distribución del soplo dentro del horno pero se incrementa el mantenimiento y viceversa. En la siguiente tabla se muestra el número de toberas con relación al diámetro del cubilote.

Tabla 3. Número de toberas en función del diámetro interno del cubilote

Diámetro interno del cubilote en mm.	Número de toberas
500	2
600	3
700	3
800	3
900	3
1000	4
1100	4

1.3.2 Aparatos de medida del soplo

Estos aparatos permiten controlar el flujo de aire de manera manual. Existen los siguientes:

- **Diafragma**

Para su adecuado funcionamiento el diafragma debe instalarse en un segmento rectilíneo de la tubería igual a diez veces su diámetro. Se trata de un disco que presenta un pequeño hueco central circular. Este disco se coloca perpendicularmente al eje de la tubería. Las tomas de presiones estáticas se hacen antes y después del disco. El flujo de aire Q es proporcional a la raíz cuadrada de la diferencia de presión:

$$Q(m^3/s) = k\sqrt{\Delta He} \quad (2)$$

donde:

ΔHe : Diferencia de presión estática medida en mm. de agua

k : Coeficiente de proporcionalidad dado por el constructor

- **Venturi**

El venturi funciona según el mismo principio del diafragma. Sin embargo, en el venturi el cambio de sección se opera de manera progresiva, lo cual origina una pérdida de presión mucho menor que en el diafragma.

Una de las ventajas del uso del venturi es que permite disminuir la longitud de la tubería ventilador-caja de viento, ya que no necesita para su instalación de un segmento rectilíneo equivalente a 10 veces su diámetro. Esto permite diseñar circuitos de aire más cortos.

Para el cálculo del flujo de aire teórico se emplea la siguiente ecuación:

$$Q = 0.0585 \times E \times \frac{d^2}{F_t} \times \sqrt{h \times P} \quad (3)$$

Q: m³/min (a presión atm. de 1.033kg/cm² y 15°C)

$$E = 0.98 \sqrt{\frac{1}{1 - (d/D)^4}} \quad (4)$$

d : diámetro de estrangulación (cm.)

F_t: factor de corrección 0.9759

h : cm. de agua

P : presión absoluta 1.033 kg/cm²

2. CARACTERIZACIÓN DE LA EMPRESA

2.1 RESEÑA HISTÓRICA

“La historia de esta empresa se remonta a finales del siglo XIX cuando Mortimer De Lima se dedicaba a la fabricación de piezas. En el año de 1935 su hijo Salomón De Lima se hace cargo de la empresa hasta 1956, cuando asume la gerencia y propiedad su hijo Roberto De Lima V., incrementándose así la fabricación de accesorios para acueductos y alcantarillados. En el año de 1973 la empresa es asumida por Beatriz Guzmán de De Lima y años más tarde ingresan a la sociedad sus hijos Roberto, Álvaro, Carlos Alberto, Salomón, Orlando y Andrés De Lima Guzmán, quienes actualmente forman parte de ella como socios o trabajadores.”

2.2 RAZÓN SOCIAL

“Fundiciones de Metales De Lima Ltda. es una empresa dedicada a la producción y comercialización de una amplia gama de piezas fundidas en hierro gris, hierro dúctil y sus aleaciones.

La producción esta constituida principalmente por accesorios para líneas de Acueducto y Alcantarillado, durante los últimos años se han diversificado las líneas de producción fabricando también piezas para el sector industrial y naval.

Dentro de los principales clientes con que contamos están las empresas de servicios públicos de acueducto y alcantarillado, los contratistas de dichas empresas, las sociedades portuarias de la costa caribe y algunas industrias que requieren elementos de fundición. En el extranjero atendemos Costa Rica, Puerto Rico y Panamá, entre otros.”

2.3 DESCRIPCIÓN DE LAS ETAPAS DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE PIEZAS EN HIERRO NODULAR

El ciclo de producción en Fundiciones de Metales de Lima Ltda. comienza recibiendo una orden interna de trabajo en la cual se relacionan los pedidos de los clientes y su fecha límite de entrega. Con esta orden interna de trabajo se realiza la programación diaria de moldeo no sin antes verificar en la lista de modelos si el modelo existe o no, si el modelo de la pieza requerida existe se determina su buen estado y si necesita alguna reparación, si el modelo no existe se fabrica de acuerdo al plano o muestra entregada por el cliente, los modelos usados pueden estar en placas o modelos sueltos.

Luego de tener el modelo este es entregado al moldeador para la fabricación del molde. Este proceso empieza por la preparación de la mezcla de arena. Dependiendo de la exigencia dimensional y a la necesidad de acabado superficial se determina si el molde se hace en arena en verde o en silicato, o cualquier otra resina utilizada (Ecolotec y Colapsil), se fabrica el macho que corresponde y se hace el molde de la pieza que se va a fundir.

En el proceso de fusión se repara el horno, se carga y se enciende para obtener el metal base que será tratado para fabricar el hierro nodular con el cual se cueban los moldes, una vez vaciado el metal se procede a desmoldear la piezas para su posterior limpieza, en este proceso se determina el tratamiento que se le va a dar en cuanto a su clasificación como producto conforme o no conforme. Si la pieza se clasifica como producto conforme se procede a su despacho a la planta de mecanizado y acabado ubicada en Vía 40, si se clasifica como no conforme se usa como retorno para el cubilote, para el rotatorio o se repara en caso que sea posible.

A continuación se describen con más detalle todos los procesos que se llevan a cabo en Fundiciones de Metales de Lima.

2.3.1 PREPARACIÓN DE MEZCLAS DE ARENA

2.3.1.1 Arena en verde

La arena procedente del desmoldeo de las piezas se somete a un ciclo de limpieza en el cual se separan manualmente los trozos de machos que hacen parte del molde, así como también todo aquel residuo diferente a arena en verde (arena al silicato, ecolotec y colapsil), la arena restante se pasa por medio de una banda transportadora a un separador magnético para extraer el metal que esta pueda contener como consecuencia del proceso de vaciado del metal, luego de pasar por el separador magnético la banda transporta la arena hacia una zaranda hexagonal giratoria donde se terminan de eliminar otras impurezas. La arena limpia es almacenada en una tolva y de allí es llevada al molino donde se mezcla con agua, arena nueva, bentonita y carbonilla para su regeneración.

Luego de preparada esta mezcla es llevada a tolvas ubicadas en los puntos de moldeo, la adición de agua y bentonita se hace con recipientes tarados para obtener aproximadamente las siguientes propiedades y proporciones:

% Humedad	4-8%
Permeabilidad	70-150
Resistencia a la compresión	0.6-1.4 Kg/cm ²

- **Arena de contacto**

Arena usada	1 cajón (medida volumétrica) 180Kg
Arena nueva	80Kg
Bentonita	2-4Kg
Carbonilla	2-4Kg
Agua	7-14Lt

- **Arena de relleno**

Arena usada	1 cajón (medida volumétrica) 260 kg
Agua	7-14 lt

Antes de iniciar su trabajo y al finalizarlo el operario debe verificar el buen estado de los equipos y la limpieza de los mismos.

Para observar el esquema de circuito de arenas ver el Anexo A.

2.3.1.2 Arenas especiales y para machos

La preparación de arenas especiales y para machos empieza con la recepción de las materias primas las cuales se relacionan en la Tabla 4 dependiendo de la arena que se quiera preparar:

Tabla 4. Materias primas para arenas especiales

Mezcla de arena	Materia prima	Proporción
Arena al silicato	Arena sílice Silicato de sodio CO ₂	100Kg. 4 - 5Kg.
Ecolotec	Arena sílice Ecolotec CO ₂	100 Kg. 3 - 3.5 Kg.

Para la preparación de la mezcla se lleva la arena sílice al molino y se mezcla por un minuto aproximadamente con el objetivo de repartir uniformemente la arena dentro del molino, posteriormente se agrega la resina teniendo cuidado de que caiga directamente sobre la arena y no sobre las paredes del molino o aspas donde se mezclan hasta alcanzar homogeneidad (aprox. 10-15 minutos), al finalizar el malaxado se extrae la mezcla del molino en sacos y se procede a hacer el molde el cual se seca con CO₂ inyectándolo en el mismo.

El operario prepara solamente la proporción de arena necesaria a utilizar de acuerdo con el molde que va a elaborar para evitar que la mezcla pierda sus propiedades con el tiempo.

La resina se adiciona usando medidas volumétricas ya establecidas para determinados pesos de arena sílice, en algunas ocasiones el operario determina por su experiencia la cantidad de cada uno de los componentes de la mezcla.

2.3.2 FABRICACIÓN DEL MOLDE

2.3.2.1 Moldeo en máquina

De acuerdo con la programación ya establecida el moldeador recibe la placa modelo con la que debe realizar el molde, así como también la respectiva caja de moldeo y las herramientas necesarias para la fabricación del molde (espátulas, letras, conos de bebedero),

Dependiendo de la pieza el moldeador recibe también los respectivos machos si los tiene y demás accesorios que requiera la pieza para la cual se va a fabricar el molde.

Una vez determinado el buen estado de la máquina de moldeo, la cual se ubica bajo la tolva se procede a hacer el molde, como se describe a continuación:

- 1) Si es una placa modelo se arma el conjunto caja superior, placa y caja inferior.
- 2) Espolvorear separador sobre la placa.
- 3) Tamizar la arena de contacto sobre el modelo.
- 4) Llenar con la arena de relleno y zapatear la caja inferior.
- 5) Prensar y colocar la tarima la cual sirve como base para el molde.
- 6) Girar el conjunto, llenar la caja superior y prensar con la máquina (tipo Jolt-Squeeze).

- 7) Dependiendo del modelo se usa el pisón neumático para ayudar a compactar el molde.
- 8) Separar el conjunto con ayuda del vibrador para retirar la placa.
- 9) Colocar los machos correspondientes.
- 10) Verificar el buen estado del molde, repararlo o volverlo a hacer.
- 11) Soplar el molde para retirar la arena suelta.
- 12) Cerrar el molde y hacer los respiraderos.
- 13) Colocar el molde sobre la mesa para ser llevado al patio donde será vaciado.

2.3.2.2 Moldeo en piso

El moldeador recibe la mezcla de arena con la cual ha de preparar el molde, este puede ser una placa modelo de dos caras, placa modelo de una sola cara, modelo suelto dividido.

- **Placa integral, placa de una sola cara, placa de dos caras**

- 1) Armar el conjunto caja superior, placa y caja inferior.
- 2) Espolvorear separador sobre la placa.
- 3) Tamizar la arena de contacto sobre el modelo y compactar manualmente en caso de que el modelo lo requiera.
- 4) Llenar con la arena de relleno y apisonar con el pisón neumático la caja inferior.
- 5) En caso de que la arena de contacto sea de silicato u otra resina inyectar el CO₂ por los orificios destinados para tal fin.
- 6) Girar el conjunto, llenar la caja superior y en caso de ser una placa integral o de dos caras repetir los pasos 3, 4, 5 y apisonar con el pisón.
- 7) Separar las dos cajas y sacar la placa modelo golpeándola con un martillo de caucho para facilitar su salida y no dañar ni la placa ni el modelo.
- 8) Colocar los machos correspondientes.
- 9) Verificar el buen estado del molde, repararlo o volverlo a hacer.

- 10) Soplar el molde para retirar la arena suelta.
- 11) Cerrar el molde, hacer los respiraderos y tallar el bebedero.

- **Modelo suelto con junta plana (completo o dividido)**

- 1) Colocar la parte plana del modelo suelto sobre una tarima y espolvorear el desmoldeante.
- 2) Colocar la caja inferior.
- 3) Tamizar la arena de contacto sobre el modelo y compactar manualmente si el modelo lo requiere.
- 4) Llenar con la arena de relleno y apisonar con el pisón neumático la caja inferior.
- 5) En caso de que la arena de contacto sea de silicato u otra resina inyectar el CO₂ por los orificios destinados para tal fin.
- 6) Girar la caja junto con la tarima y retirar la tarima.
- 7) Espolvorear separador sobre la cara expuesta del modelo, si es un modelo dividido colocar la otra mitad ajustando las guías.
- 8) Repetir los pasos 3, 4 y 5.
- 9) Separar las cajas, retirar el modelo y hacer los ataques.
- 10) Cerrar la caja.
- 11) Hacer los respiraderos y tallar el bebedero.

- **Modelo suelto con junta irregular**

- 1) Colocar la caja falsa en el sitio de moldeo, llenarla de arena en verde y apisonar.
- 2) Se hace sobre la arena en verde una base de arena al silicato y se aprisiona contra esta la cara del modelo.
- 3) Verificar que la imprenta del modelo este bien copiada en la arena.
- 4) Tallar la línea de junta de acuerdo a las salidas del modelo.
- 5) Inyectar el CO₂.

- 6) Colocar la caja inferior sobre la caja falsa.
- 7) Espolvorear el separador.
- 8) Tamizar la arena de contacto sobre el modelo y sobre esta adicionar la arena de relleno, apisonar.
- 9) Inyectar el CO₂
- 10) Retirar la caja inferior e invertirla.
- 11) Colocar nuevamente el modelo en la caja inferior y repetir los pasos 7, 8 y 9 para la caja superior.
- 12) Separar las cajas, sacar el modelo y colocar los machos.
- 13) Hacer el canal, los ataques y soplar para retirar la arena.
- 14) Cerrar la caja, hacer los respiraderos y tallar el bebedero.

2.3.3 FUSIÓN

2.3.3.1 Cubilote

El horno de cubilote usado es ácido de 850 mm de diámetro interno, consta de un sistema de doble hilera de toberas. Posee un control de aire ejercido por dos tubos venturi, uno para controlar el flujo de aire de las toberas superiores y el otro para controlar el flujo en las toberas inferiores, las toberas tienen forma rectangular con una inclinación desconocida.

Para mejorar el rendimiento térmico de este horno se usa inyección de oxígeno por las toberas inferiores, además cuenta con un sistema de refrigeración con agua en la carcasa (manto de agua entre las toberas superiores y las inferiores).

- **Reparación del horno**

Para iniciar la reparación del horno este se limpia o repica para quitar de sus paredes la escoria, posteriormente se reparchan con una mezcla de cuarzo a la

cual se le adiciona agua en caso de ser necesario, esta operación debe hacerse teniendo en cuenta el diámetro del horno que debe ser de 850 mm.

Luego de reparar las paredes del horno se prepara la solera con arena de moldeo y posteriormente se arregla el orificio de escoria y el de la piquera.

Finalmente se carga en el horno leña la cual es encendida para curar la capa de refractario y eliminar la humedad de la arena de relleno usada en la solera.

- **Cargue y encendido**

El cargue se hace en tres etapas. La primera de ellas es escoger el mejor coque, cuyas características son buen tamaño (menudo), buena porosidad (fina y homogénea), buen color (gris metálico) y buena resistencia. Este coque se separa a mano y es el utilizado en la cama del horno.

Una vez escogido el coque se procede a cargarlo lentamente dentro del horno por medio de un elevador de cangilones y simultáneamente se va encendiendo ayudado por el calor de la leña y el aire que entra al horno por las toberas y la puerta de encendido las cuales se encuentra completamente abiertas.

Luego de haber cargado la cama se espera a que el coque tome un color rojo cereza, se cierran la toberas y la puerta de encendido, se tapa el escoriadero, se prende el ventilador y se sacan cenizas. Posterior a esto se verifica la altura de la cama de coque y si es la establecida se inicia la segunda etapa del cargue del cubilote la cual es introducir dentro del horno tres cargas de metal (180 Kg.), coque (60 Kg) y caliza (18 Kg) respectivamente, esto se hace con el ventilador apagado. En la tercera etapa se enciende de nuevo el ventilador y se inicia la fusión, el tiempo de cargue debe ser tal que permita cargar en el horno siete cargas de coque por hora y cada cinco cargas una carga extra después de la tercera carga.

- **Operación de fusión**

Una vez encendido el ventilador se espera a que el metal que sale por la piquera tenga fluidez y buena temperatura, cuando esto ocurre se tapa el orificio de la piquera con un tapón de arcilla para dejar acumular el metal líquido, posteriormente se pica el horno y se sangra el metal cada quince minutos, hasta finalizar la fusión.

Durante el proceso de fusión se deben picar periódicamente las toberas para permitir la libre entrada de aire hacia el horno y además abrir el escoriadero después de la tercera sangrada, teniendo la precaución de mantenerlo limpio y verificar que el orificio no se abra demasiado, en caso que esto ocurra se apaga el ventilador y se repara para poder continuar con el proceso de fusión.

- **Proceso de esferoidización e inoculación**

Una vez obtenido el metal base del cubilote se procede a su tratamiento de nodulización, para el cual se pesa la cantidad de liga que se va a utilizar de acuerdo al peso de metal base a tratar, esta se introduce en el fondo de la cuchara ya precalentada, que cuenta con una serie de marcas que corresponden a diferentes pesos de metal, las cuales son observadas por el operario para determinar si el peso de metal ha sido completado, posteriormente se cubre la ferroaleación con resina utilizada en el proceso shell cuya función es aislar la liga del baño de metal formando una cascarilla sobre esta, la cual debe resistir hasta que el peso de metal base sea completado, una vez completado el peso del metal se procede a tapar la cuchara con una tapa que cuenta con cuatro agujeros que permiten introducir una varilla para quebrar la cascarilla de resina y dar inicio a la reacción.

Al finalizar la reacción se retira la tapa y se limpia el metal de los residuos dejados por el proceso, se adiciona el “Slaxing” (coagulante de escoria) y al pasar el metal de la cuchara a los baldes se inocula con ferrosilicio en polvo el cual es adicionado en el chorro del metal líquido, luego se procede al llenado de los moldes. A continuación se muestra esquemáticamente el tratamiento de esferoidización:

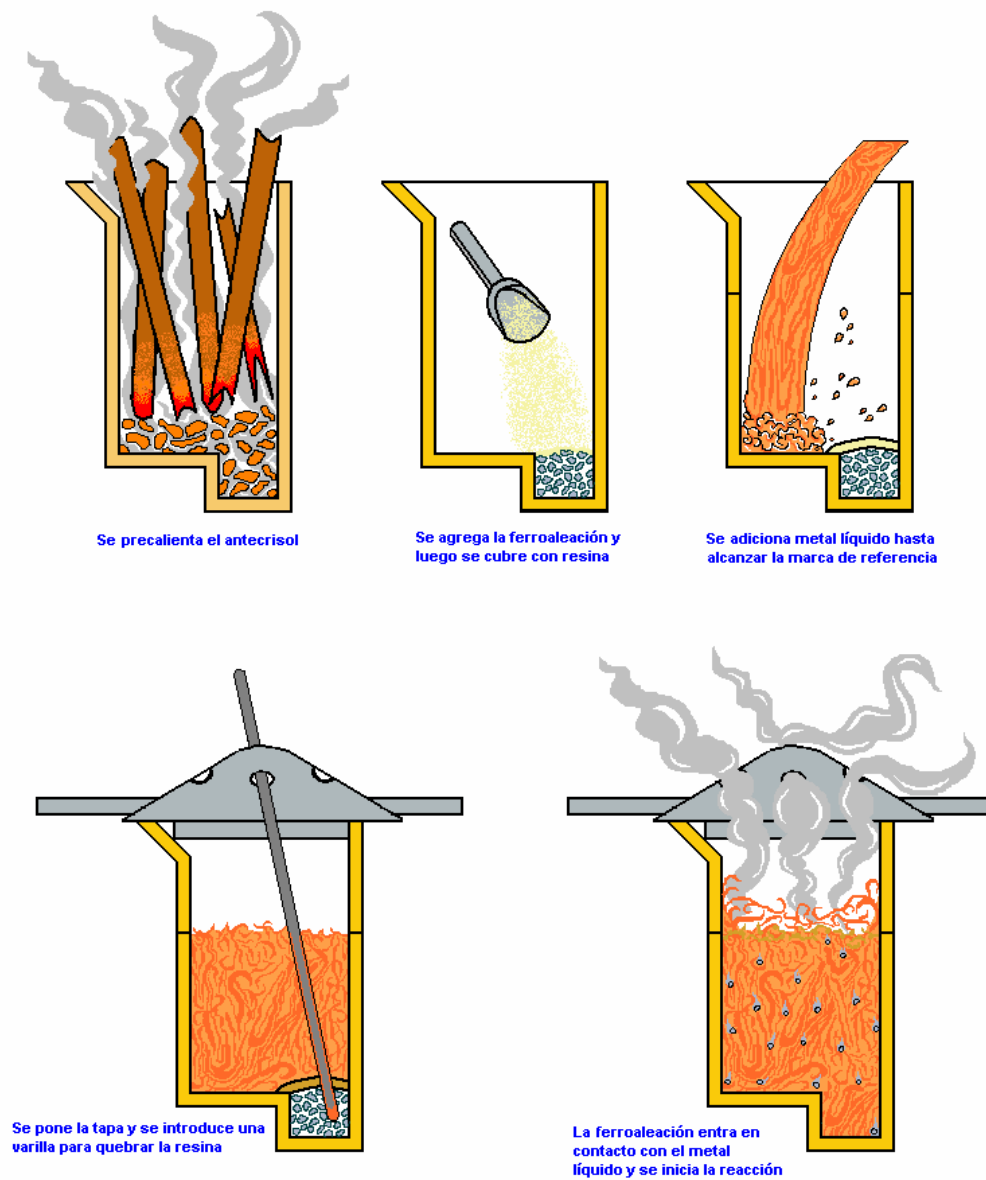


Figura 5. Esquema del tratamiento de esferoidización

2.3.3.2 Horno rotatorio

- **Cargue y encendido del horno**

Se pesan las cargas de acero, retorno, caliza, arena, grafito, vidrio y lingote teniendo en cuenta la capacidad del horno que es de 1300 kg de metal. El orden de las cargas se establece teniendo en cuenta la oxidación de estos elementos. Para encender el horno se abre primero la válvula del gas y luego la del oxígeno, se acerca una mecha al quemador para encenderlo, y se introduce el quemador en el cuerpo del horno.

- **Reparación del horno**

La complejidad de la reparación del horno depende de que tanto daño sufra durante la fusión. Cuando se hacen más de una fusión diaria se bascula el horno para retirar la escoria y se procede cargarlo de nuevo.

En algunas ocasiones es necesario quitar las tapas del horno para reparar el refractario, y se revisa el recubrimiento del cuerpo del horno para determinar si necesita alguna reparación adicional.

- **Operación de fusión**

Luego de encendido el horno se procede a la fusión del metal teniendo en cuenta el siguiente ciclo:

- 1) Ciclo de precalentamiento a baja potencia
- 2) Ciclo de calentamiento a alta potencia (material pastoso)
- 3) Ciclo de rotación a un cuarto alta potencia
- 4) Ciclo de rotación continua a alta potencia

NOTA: Los términos alta y baja potencia corresponden a la temperatura de la llama del quemador.

Cumplido este ciclo se pica el horno, se bascula y se extraen aproximadamente 50 kg de metal para medir su temperatura y determinar composición química del metal base. Si la temperatura no es la adecuada para el tratamiento de esferoidización se repite el cuarto ciclo disminuyendo el flujo de gas. En caso que la composición no este dentro de los rangos establecidos se toman las medidas correctivas.

Para la siguiente fusión se hacen solo los tres últimos ciclos ya que el horno ha alcanzado determinada temperatura.

- **Proceso de esferoidización e inoculación**

Este se realiza igual que para el cubilote, se diferencian solamente en el diseño de la cuchara que es movida por el polipasto eléctrico.

2.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS MÉTODOS DE CONTROL DE CALIDAD

2.4.1 Preparación de mezclas de arena

2.4.1.1 Materias primas para la preparación des mezclas de arena en verde y especiales

Las materias primas utilizadas son las siguientes

Bentonita

Carbonilla

Arena sílice

Silicato de sodio

Colapsil

Arena Pivijay

El control de la arena sílice y la carbonilla se hace por medio de inspección visual comparándolas con muestra patrón enviadas por los proveedores (forma, tamaño de grano, color). Para la bentonita sólo se verifica que el empaque lleve escrito bentonita sódica en letras rojas.

Al resto de materias primas se les hace comparación con las fichas técnicas.

2.4.1.2 Determinación de la humedad

Para este control se toma la muestra de arena proveniente de la tolva de descargue de la misma (previamente tamizada) posteriormente se pesan 50 g de la muestra en una balanza de precisión, se coloca en el plato uniformemente distribuida formando una capa delgada y se lleva a la lámpara de secado durante 6 minutos, se pesa de nuevo y se saca el porcentaje de humedad como porcentaje en peso, de acuerdo a la siguiente formula:

$$\% \text{ Humedad} = [(P_i - P_f) / P_i] * 100$$

NOTA: Las demás propiedades de las mezclas de arena en verde como compactación, resistencia a la compresión, permeabilidad, granulometría y porcentaje de arcilla se hacen en laboratorios externos. No se ejercen control sobre las propiedades de las mezclas de arenas especiales.

2.4.2 FABRICACIÓN DEL MOLDE DE ARENA EN VERDE

2.4.2.1 Determinación de la dureza

Para esta prueba se utiliza un durómetro de escala B, el cual se coloca verticalmente sobre la superficie del molde presionándolo ligeramente hasta que el plato redondeado del plato del durómetro haga contacto con la arena en toda su superficie, la profundidad de la penetración indica la dureza en verde la cual se lee directamente del dial.

2.4.2.2 Inspección visual

Durante el proceso de moldeo se hace este control para verificar que los moldes tengan todos los accesorios que necesita determinada pieza, que no tengan ángulos vivos, y se determina si necesita alguna reparación antes de cerrarlo, también se revisa que los machos correspondientes estén debidamente colocados en el molde y que tengan el correcto trazado de los respiraderos.

2.4.3 MATERIAS PRIMAS PARA LA FABRICACIÓN DEL METAL BASE

Las materias primas utilizadas en este proceso son la siguientes:

Lingote

Caliza

Retorno

Coque

Acero

El control de cada una de estas materias primas se hace por medio de inspección visual y de comparación de las propiedades físicas (color, tamaño) con la ficha técnica de cada material, a excepción del retorno que es controlado por medio de análisis espectrométrico.

2.4.4 CONTROLES DE LA OPERACIÓN DEL CUBILOTE

Se verifica que el cubilote haya sido reparado, y que tenga las dimensiones adecuadas (diámetro interno), se confirma también el buen funcionamiento del sistema de refrigeración y del sistema de carga.

En cuanto al canal de sangrado del metal se revisa que después de su reparación el refractario tenga un ángulo adecuado para que permita la canalización del chorro de metal, se verifica también que la solera este debidamente apisonada y que su ángulo de inclinación hacia la piquera sea el establecido, sin embargo esto no se hace siempre.

Para la medición de la altura de la cama de coque el operario dispone de una cadena cuya longitud equivale a la distancia entre la puerta de carga y el nivel de la cama, la cual se a establecido previamente, esta medición se hace antes de iniciar el cargue del cubilote y cuando el coque se encuentra al rojo.

Durante la operación del horno es importante determinar el flujo de aire, por esta razón se debe revisar se hay alguna fuga en las mangueras que se usan para medir este parámetro para que los datos obtenidos por medio de la lectura de las columnas sean confiables.

Durante la fusión:

Se hace la medición de las columnas de aire para establecer un flujo de aire constante durante toda la fusión, manteniendo el régimen de carga adecuado, se limpian las toberas para no obstruir el paso del aire y se mantiene en nivel de la cama de coque haciendo una observación de la coloración que toma la escoria durante el proceso, sin embargo este control sobre la escoria no se hace a menudo, solo ocasionalmente.

2.4.5 CONTROLES AL METAL BASE

2.4.5.1 Medición de la temperatura

Se toma el pirómetro de inmersión y se introduce en el caldo en un área limpia de escoria y alejada de las paredes de la cuchara y se mantiene fijo hasta que se estabilice el valor de temperatura que se lee en la pantalla. Dependiendo del valor de la temperatura se determina si se realiza el tratamiento de nodulización.

2.4.5.2 Determinación de la composición

Para hacer este control se toma una muestra de metal base y se cuela en una coquilla cilíndrica con 3.5 cm. de altura y 4 cm. de diámetro, posteriormente se esmerila y pule la superficie (lija 80) para analizarla en el espectrómetro de chispa. Los resultados obtenidos se comparan con los parámetros ya establecidos por la empresa.

Nota: la probeta utilizada para el ensayo se debe enfriar luego de su solidificación lo más rápido posible, con el objetivo de evitar la presencia de grafito libre y segregación en la muestra lo cual llevaría a interpretaciones erróneas de los resultados obtenidos, con este propósito se enfría la probeta en agua.

2.4.5.3 Control de cargas del cubilote

La chatarra se clasifica en el patio de la empresa, en colado, lingote, retorno de hierro gris, retorno de hierro nodular y acero, de los cuales se escogen para preparar la carga el acero, retorno de hierro nodular y lingote. En caso que el retorno usado sea muy grande se fragmenta en pedazos más pequeños para cargarlo fácilmente en el cubilote, estas cargas se pesan en la báscula de acuerdo al cálculo hecho previamente.

NOTA: Por razones de privacidad la empresa no permitió colocar en este libro los pesos de las cargas metálicas ni la composición química del metal base obtenido.

2.4.6 CONTROLES AL TRATAMIENTO DE INOCULACIÓN Y ESFEROIDIZACIÓN

2.4.6.1 Inspección visual a las materias primas para la inoculación y esferoidización

Para este tratamiento se utiliza ferrosilicio, al cual se le hace una inspección visual observando su color y tamaño, se hace también comparación contra la ficha técnica con la que cuenta la empresa.

2.4.6.2 Control del tiempo de colada

Este control se hace con el objetivo de colar el metal en un tiempo menor de 6 minutos, tiempo en el cual pasa el efecto nodulizante de la liga, cada trabajador sabe esta condición y hacen la colada dentro de este límite de tiempo.

2.4.6.3 Determinación del peso de ferroaleaciones inoculantes y esferoidizantes

De acuerdo al peso de metal base a tratar se calcula el peso de las ferroaleaciones, para esto se hace uso de un programa con el que cuenta la empresa en el cual se relaciona el peso del metal que se va a nodulizar, la temperatura, el tiempo de colada y el magnesio residual.

2.4.7 CONTROLES AL METAL YA TRATADO

2.4.7.1 Control de composición

Este ensayo se hace de la misma manera que el realizado para controlar la composición del metal base mencionado anteriormente.

2.4.7.2 Prueba de cuña

Simultáneamente con la probeta de composición se cuela una probeta de cuña en un molde de arena al CO₂, se enfría en agua y se fractura, observándose el color, textura, y forma de la fractura. Otro ensayo de campo con esta probeta es el del sonido y el olor que produce al exponerla al vapor de agua

2.4.7.3 Ensayo de doblez

Se fabrica un molde en CO₂ y se coloca en el patio para su posterior colada, luego de solidificada la probeta se desmoldea, se separa del bebedero, se hacen marcas en cada extremo de la probeta una distancia de 6cm, una da la referencia para colocarla en la prensa y la otra para ubicar el tubo, se procede a doblar la probeta y dependiendo del ángulo de doblez se puede determinar aproximadamente el tipo de matriz que se obtiene.

NOTA: Prueba de doblez según Instructivo del SENA

2.4.8 CONTROLES A LAS PIEZAS YA TERMINADAS

2.4.8.1 Ensayo de metalografía

Una vez tomada la probeta de composición se elige una pieza que corresponda a esa composición, se corta un pedazo de canal o pieza defectuosa, se monta en puliduro, se pule la superficie con la pulidora de disco y con la siguiente secuencia de lijas, 60, 80, 150, 220, 240, 320, 360, 400 y 600 teniendo en cuenta que al cambiar de lija se debe rotar la probeta 90 grados y pulirla hasta que las marcas

dejadas por la lija anterior se borren, luego se le da brillo especular con el paño y utilizando una solución de alúmina sobre el paño la cual actúa como abrasivo.

Una vez preparada la muestra se limpia con alcohol para eliminar los rastros de alúmina y se coloca en el plato del microscopio ya encendido a 100 aumentos ajustando el objetivo del microscopio hasta obtener una imagen nítida de la microestructura, se determina el grado de nodulización y el número de nódulos por milímetro cuadrado por medio de comparación de la microestructura observada con los patrones correspondientes. Posteriormente se ataca la superficie con nital, teniendo la precaución de no sobre atacarla y limpiarla con alcohol después del ataque, observar la muestra al microscopio para determinar el porcentaje de perlita y ferrita presente en la matriz, también por comparación con los patrones ya establecidos. Estos patrones pertenecen a la AFS y representan microestructuras de hierro nodular.

2.4.8.2 Inspección visual

Una vez desmoldeadas las piezas se les hace una inspección visual con el fin de detectar defectos que se hayan presentado en el producto terminado y tomar las medidas respectivas para corregirlos. Una vez hecha la inspección visual se separan las piezas buenas y las defectuosas colocando estas últimas en la zona de piezas no conformes y debidamente separadas de acuerdo con el defecto presentado, y al tratamiento o disposición que se le vaya a dar a la pieza, reproceso, reclasificación, reparación, derogación y rechazo.

2.4.8.3 Control dimensional

Teniendo las piezas conformes se procede a verificar sus dimensiones según las tolerancias correspondientes para maquinado y terminado de la pieza, en caso de no cumplir con lo establecido se toman las medidas necesarias para corregir las

dimensiones como las siguientes: modificar la placa modelo o modelo suelto y si es el caso cambiar el sistema de moldeo.

2.5 EQUIPOS UTILIZADOS EN EL CONTROL DE CALIDAD

2.5.1 Espectrómetro de chispa

La empresa cuenta con un espectrómetro de chispa OES 5500 comprado a Shimadzu para hacer la determinación de la composición química tanto del metal base como del hierro nodular que se fabrica.

Sus aplicaciones incluyen la determinación cuantitativa de elementos que pueden estar presentes en una muestra en solo trazas o en proporciones mayores.

El equipo se ubica en el laboratorio de calidad de la empresa y su principio de funcionamiento es el siguiente:

Cuando se genera una descarga entre la muestra y el electrodo contenido en la cámara de quema parte de la muestra es vaporizada y este vapor excitado emite una luz que contiene líneas espectrales peculiares que corresponden a los elementos que contiene dicha muestra. Esta luz se dispersa dentro del espectrómetro y es captada por los fotomultiplicadores los cuales las convierten en señales electrónicas.

2.5.2 Microscopio

Este equipo se encuentra ubicado en el laboratorio de calidad de la empresa y se usa para hacer el análisis metalográfico al metal obtenido. Cuenta con cuatro objetivos de 10X, 24X, 40X y 100X, una cámara digital marca SONY.

3. DIAGNÓSTICO AL CONTROL DE CALIDAD EN FUNDICIONES DE METALES DE LIMA LTDA.

Con el fin de determinar los problemas y ofrecer posibles soluciones, se ha hecho un seguimiento y posterior caracterización de los procesos y controles de calidad hechos en Fundiciones de Metales de Lima Ltda.

En el siguiente diagnóstico se presenta la situación actual de la empresa en cuanto a la aplicación de controles que permitan obtener piezas de buena calidad.

Los procesos controlados son los siguientes:

- Preparación de mezclas de arena en verde y especiales
- Fabricación del moldes de arena en verde
- Fabricación del metal base
- Operación del cubilote y del horno rotatorio
- Tratamiento de esferoidización e inoculación
- Metal tratado
- Producto terminado

Durante la caracterización de los controles de calidad se determinó lo siguiente:

3.1 PREPARACIÓN DE MEZCLAS DE ARENA EN VERDE Y ESPECIALES

Para la preparación de estas arenas se empieza controlando las materias primas adquiridas para tal fin, esto se hace por medio de la comparación con una muestra patrón e inspección visual. Sin embargo este procedimiento no se hace siempre, ya que pocas veces se compara con el patrón enviado por el proveedor.

En cuanto al control del ciclo de limpieza de la arena en verde se observaron algunas dificultades en la separación de partes metálicas provenientes de la colada del metal, sin embargo, gracias a que se tamiza la arena de contacto en el momento de hacer el molde se pueden disminuir los efectos de este problema.

A la mezcla de arena en verde ya preparada se le hace ensayos de permeabilidad, humedad, resistencia a la compresión, contenido de arcilla AFS y granulometría; sin embargo, estos ensayos no son representativos y no permiten determinar el verdadero estado de la arena utilizada, ya que se hace en laboratorios externos una vez al mes.

Para la preparación de arenas especiales no se pesan los materiales utilizados sino que se hace por la experiencia de los operarios.

3.2 FABRICACIÓN DE MOLDES EN ARENA EN VERDE

En la fabricación de los moldes no se presenta mayores dificultades gracias a que se cuenta con operarios experimentados, los controles hechos a los moldes son los de inspección visual y dureza, esta última se toma ocasionalmente por que se conoce el grado de apisonamiento de cada operario. La inspección visual es un autocontrol ejercido por cada moldeador.

3.3 FABRICACIÓN DEL METAL BASE

En cuanto al almacenamiento de las materias primas utilizadas en la carga de los hornos de fusión, no es el más adecuado (retorno, lingote, coque, caliza) debido a que éstas se encuentran a la intemperie, lo cual afecta la calidad del metal base obtenido.

La determinación de la composición del metal base se hace por medio de análisis espectrométrico, el cual es acertado y permite realizar en forma rápida los

cálculos para determinar la cantidad de esferoidizante a utilizar, este control se hace para el horno rotatorio y con menos frecuencia para el cubilote.

El peso de los materiales usados es inexacto en lo que respecta al acero ya que como se realiza por medida volumétrica en recipientes tarados y su presentación es en láminas, dependiendo de como éstas encajen pueden haber más o menos peso, lo cual puede causar contratiempos inesperados en el proceso; además de esto, existen pérdidas de material debido a que el piso donde se encuentra el acero es de arena y las láminas se entierran en este dificultando su utilización en el proceso.

El control de la temperatura se hace por medio de un pirómetro de inmersión antes de iniciar el tratamiento de esferoidización. Esto, por lo general, sólo se hace cuando se cueban piezas especiales y para el horno rotatorio, en el cubilote en cambio, no se controla a menudo este parámetro, sin embargo debe hacerse siempre.

3.4 OPERACIÓN DEL CUBILOTE

Para el control de la operación del cubilote se toman en cuenta dos aspectos, su preparación y su comportamiento durante la fusión, en el primero no se ejerce ningún control sobre la mezcla preparada para reparar el refractario, ésta se hace con la experiencia de los operarios, además, las condiciones iniciales del horno no son inspeccionadas (diámetro interno, inclinación de las toberas orificio del escoriadero, piquera y puerta de encendido) antes de iniciar la operación. El único parámetro que se controla es la altura de la cama de coque la cual se mide cuando el coque adquiere un color rojo incandescente, por medio de una cadena como se muestra en la figura 6.

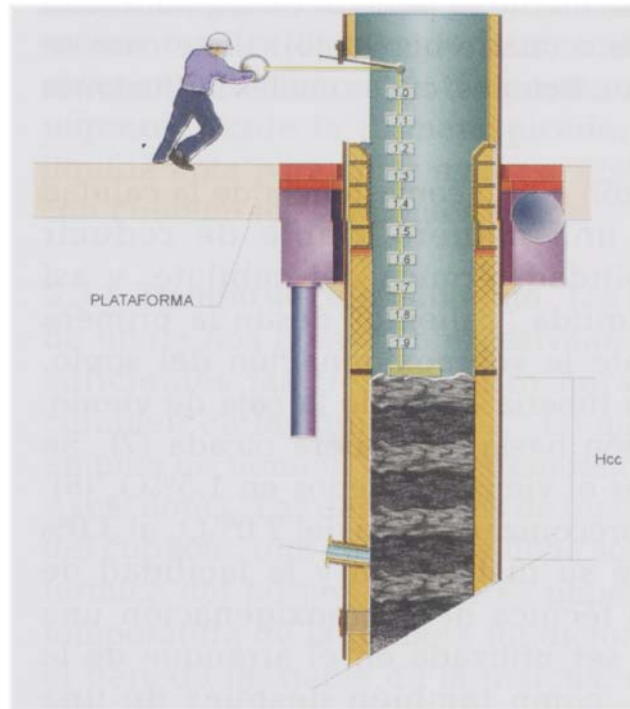


Figura 6. Medida de la altura de la cama de coque

Antes de encender el horno se preparan las cargas metálicas, las cuales son pesadas y ubicadas cerca del sitio de cargue. El control de las cargas de caliza y coque se hace por medida volumétrica que aunque es un método que facilita la operación, no es el más adecuado para la preparación de las cargas, estas deben pesarse para hacer el proceso más confiable.

Durante la fusión se ejerce control sobre las columnas del venturi, sin embargo, este no es satisfactorio principalmente por que no se tiene determinada la altura que ésta debe tener, así como tampoco se tiene el valor exacto del caudal de aire arrojado por el ventilador, sin embargo, se están realizando mediciones de presión, velocidad y caudal de aire en la tubería con el fin de fijar este parámetro. En cuanto a la temperatura del metal ésta no es lo suficientemente alta lo cual está ocasionando problemas en la operación del cubilote como taponamiento del

orificio de la piqueta y como consecuencia, parte del metal se debe lingotear, este problema no es una constante en el proceso.

Esto demuestra la importancia de la medida del tiempo de cargue del horno, clasificación del coque, verificación del tiempo de encendido, preparación y peso de las cargas metálicas, porcentaje de coque entre carga y medición del soplo a la salida del ventilador.

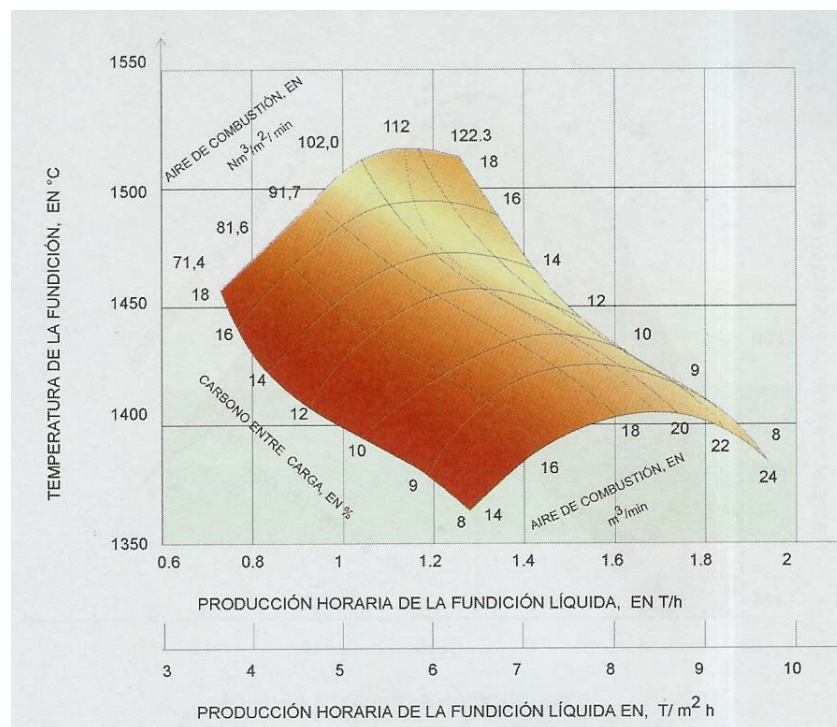


Figura. 7 Diagrama reticular estándar de un cubilote de viento frío enfriado con agua, según Jungbluth

De acuerdo con el diagrama de Jungbluth encontrado en la literatura mostrado en la Figura 7 y a los parámetros de la marcha del cubilote, caudal de $62.02\text{m}^3/\text{min}$ ($109.02\text{m}^3/\text{m}^2/\text{min}$) y coque entre carga de 17% se debería obtener una temperatura aproximada de 1505°C , sin embargo, la temperatura alcanzada durante la operación se encuentra dentro del rango de $1400\text{-}1412^\circ\text{C}$, esto puede

deberse a un mal encendido del cubilote, ya que en algunos casos es forzado, puede ser también consecuencia de un exceso de coque entre carga y un flujo de aire insuficiente para ese coque, el tamaño de la carga, en especial del lingote no es adecuado, este es grueso (11x30cm) y causa mayores dificultades en el precalentamiento de la carga, en cuanto al coque se podía apreciar que la carga enviada por el proveedor no siempre era la adecuada, por que se observaban trozos mal coquizados y con un tamaño muy heterogéneo.

Otra causa puede ser el hecho que la llama en el cubilote es periférica, lo que ocasiona una combustión ineficiente y por lo tanto baja temperatura.

Existe dificultad para observar las gotas de metal por las toberas durante la fusión lo cual no permite establecer si el metal está oxidado o no, esta dificultad radica en que la inclinación de las toberas inicia en el refractario y reduce el área de observación cómo se observa en la figura 8.

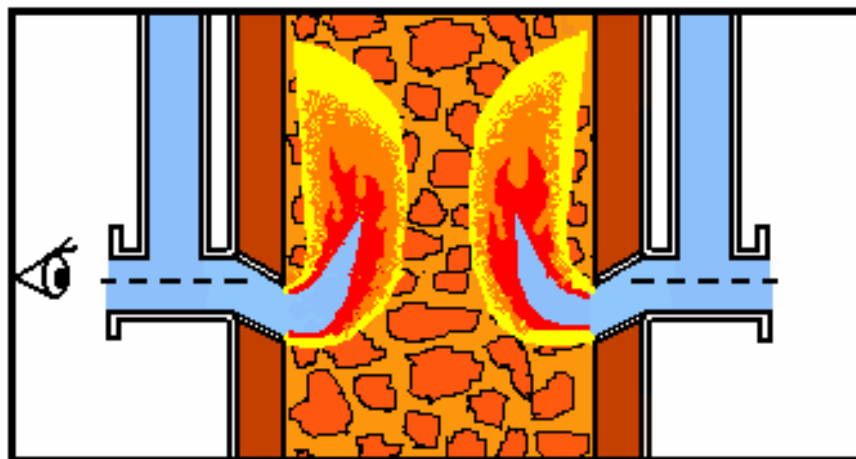


Figura 8. Efecto de la inclinación de las toberas sobre la forma y altura de la zona de combustión

Durante la fusión se observó que la llama del cubilote en la puerta de carga toma una forma periférica, lo cual puede ser indicativo de una baja velocidad del aire en

las toberas y de una zona de combustión también periférica efectuándose la fusión cerca del refractario que puede ser también la causa de que éste se consuma tan rápido en el proceso de fusión.

En cuanto a la escoria, no se ejerce un control frecuente sobre su color y fluidez. Con el fin de mantener la cama nivelada se carga coque adicional cada cinco cargas después de la tercera, sin embargo, esto algunas veces no es necesario ocasionando que el horno se llene hasta la puerta de cargue, y como consecuencia se produce un atraso en la alimentación del horno.

En el cargue del horno rotatorio no se ejerce control sobre el tamaño de la carga, lo que hace variar los tiempos de fusión, tampoco se controla el estado del refractario del horno luego de su reparación, esto genera dificultades durante la fusión ya que en algunas ocasiones la capa de refractario se cuartea y la radiación de calor afecta las paredes del horno.

A diferencia del cubilote, el horno rotatorio permite un control más fácil de la temperatura; si al medirla ésta no es la adecuada, se puede dar más tiempo al metal líquido para que alcance la temperatura establecida para el tratamiento, siempre y cuando la composición del metal base lo permita.

3.5 TRATAMIENTO DE INOCULACIÓN Y ESFEROIDIZACIÓN

En el método de esferoidización descrito en la caracterización se ha observado que en algunas ocasiones la reacción inicia antes de completar el peso de metal a tratar, debido a que la capa de resina utilizada no es lo suficientemente resistente, contrario a esto, algunas veces no se puede quebrar la capa de resina y no es posible llevar a cabo la reacción, esto puede ser consecuencia de que no se pesa la resina a utilizar. Cabe anotar que este inconveniente no es una constante en el

proceso, sin embargo, debe hacerse este control que es sencillo y afecta directamente la calidad del metal obtenido.

Es indispensable conocer la cantidad de metal base a tratar para utilizar la proporción adecuada de liga, en un principio el peso del metal se determinaba tarando la cuchara donde se recibe el metal base, sin embargo, esta medida no es exacta y presentaba dificultad para el operario observar las marcas en la cuchara en el momento de completar la medida.

Uno de los aspectos que se tienen en cuenta para calcular la cantidad de liga además del peso del metal base, es su composición química, más exactamente su contenido de azufre, este control se hace por medio de análisis espectrométrico (se toman dos muestras, una al inicio de la fusión y otra en el intermedio de esta) el cual es exacto y permite tener un valor aproximado del peso de liga que se debe utilizar en el proceso para obtener un buen hierro nodular.

Estos controles se ejercen tanto para el tratamiento en el cubilote como en el horno rotatorio.

3.6 METAL TRATADO

Al metal tratado se le controla la composición química por medio de análisis espectrométrico, la probeta usada presenta problemas de porosidad lo que no permite leer la composición a tiempo e incluso no se puede hacer, en algunas ocasiones se quema la probeta varias veces en el mismo lugar hasta que arroja un resultado similar a lo esperado, práctica que no es recomendable ya que puede perjudicar la lectura de algunos elementos como carbono, silicio y magnesio.

Adicional a esto, las dimensiones de la probeta no son apropiadas; debido a su tamaño se pueden presentar variaciones de composición a medida que se solidifica.

Se realizan dos ensayos de campo, el de cuña y el de sonido, los cuales permiten reconocer en forma aproximada que tan buena es la calidad del metal obtenido.

En el ensayo de cuña, se observa el tipo de fractura, la estructura de la misma y el olor que toma al exponerla al vapor de agua, al golpear la pieza de hierro nodular ésta debe emitir un sonido claro y nítido, los moldes de la cuña se fabrican en arena al silicato de sodio y debido a que es un ensayo de campo representa un costo adicional.

Estos controles se realizan en cada tratamiento de esferoidización tanto para el horno rotatorio como para el cubilote. Durante el llenado de los moldes, se ha observado que la altura de colada es muy elevada, ocasionando piezas levantadas y salidas.

3.7 PRODUCTO TERMINADO

Al producto terminado se le hace inspección visual, control dimensional y análisis metalográfico, y se determina que tratamiento se le va a dar en caso que sea clasificado como producto defectuoso, entre los defectos más comunes se encuentran los derrumbes, pegas, rechupes, piezas incompletas, piezas levantadas y sopladas.

La inspección visual y el ensayo de metalografía arrojan resultados confiables y en el justo momento para aplicar medidas correctivas en caso de encontrar alguna no conformidad.

El control dimensional se realiza satisfactoriamente de acuerdo con las especificaciones de los clientes y al final del proceso las piezas entregadas cumplen con este control de calidad.

4. ENSAYOS Y CONTROLES PROPUESTOS

Realizado el diagnóstico tanto de los procesos como del control de calidad de los mismos proponemos los siguientes ensayos y controles.

Con la realización de ensayos tales como el de granulometría, compactabilidad, resistencia a la compresión porcentaje de humedad y porcentaje de arcilla AFS, es posible para la empresa tener un fundamento para tomar decisiones con respecto a las proporciones de los componentes de la mezcla de arena, lo que permite mejorar la calidad y reducir gastos en materias primas (bentonita, carbonilla etc.). De igual manera, se proponen algunos controles y mejoras en cuanto a la materia prima usada para la producción del hierro nodular, con lo que se espera un mejor control sobre sus propiedades.

4.1 CONTROL DE MEZCLAS DE ARENA DE MOLDEO

Se estableció construir el equipo para la determinación de arcilla convencional AFS de acuerdo a los estándares de la norma, cuyo esquema es presentado en el Anexo B.

Para la determinación de la humedad se propone seguir el procedimiento según la norma AFS y comprar una balanza más precisa que la existente.

4.1.1 Determinación de arcilla AFS

- 1) Tomar 50 g de una muestra representativa a la cual se le ha extraído la humedad y colocarla en el vaso de precipitado de 1000 ml.
- 2) Añadir 475 ml de agua destilada a temperatura ambiente y 25 ml de hidróxido de sodio al 3% al vaso de precipitados.
- 3) La solución de hidróxido de sodio se prepara disolviendo 30 g de este en agua

destilada y diluyendo a un volumen total de 1000 ml.

- 4) Llevar la muestra al agitador eléctrico y mezclarla durante 5 min.
- 5) Lavar la arena adherida al agitador hacia adentro del vaso de precipitados. Dejar decantar por 10 min y entonces eliminar el agua por sifón, dejando una profundidad mínima de 1 pulg. de agua desde el fondo del vaso.
- 6) Adicionar nuevamente 475 ml de agua destilada y agitar los sedimentos del fondo, dejar decantar por 10min y eliminar el agua por sifón, dejando 1 pulg. de agua desde el fondo del vaso.
- 7) Repetir el paso anterior pero en esta ocasión dejar decantar por 5 min. Hacer este mismo procedimiento las veces que sea necesario hasta que el agua esté clara al final del asentamiento de 5 min.
- 8) Cuando el agua esté clara, filtrar la muestra y secarla a 105-110°C. Pesar el residuo obtenido.
- 9) Determinar la arcilla AFS como porcentaje de la muestra original de acuerdo con la siguiente fórmula.

$$\% \text{ Arcilla AFS} = [(P_i - P_f) / P_i] * 100$$

P_i: peso inicial de la muestra

P_f: peso final de la muestra

4.1.2 Determinación de la humedad

- 1) Tomar una muestra representativa de arena y pesar 50 g de dicha muestra.
- 2) Colocar la muestra sobre la bandeja de la lámpara, formando una capa delgada uniformemente distribuida para facilitar y agilizar el secado.
- 3) Encender la lámpara y dejar la muestra por un tiempo inicial de 10min.
- 4) Pesar la muestra y secar nuevamente por un tiempo de 6min y pesar nuevamente.
- 5) Si el peso disminuye repetir el ciclo de secado dejando la muestra por 2min

hasta peso constante.

- 6) Determinar la humedad como porcentaje de la muestra original, de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Humedad} = [(P_i - P_f) / P_i] * 100$$

P_i: peso inicial de la muestra

P_f: peso final de la muestra

De acuerdo a lo concluido en el diagnóstico se propone equipar el laboratorio de arenas con una tamizadora, un juego de tamices serie DIN para realizar el ensayo de granulometría descrito a continuación, y el equipo de compactabilidad para la realización de este ensayo.

4.1.3 Análisis granulométrico

- 1) Pesar una muestra de arena que ha sido previamente lavada para eliminar la arcilla AFS.
- 2) Comprobar que los tamices se encuentran completamente limpios y en buen estado.
- 3) Ensamblar la serie de tamices en orden decreciente de abertura de malla hasta llegar a la bandeja o plato final.
- 4) Conservando el orden anterior, colocar la serie de tamices sobre el dispositivo agitador asegurando su verticalidad y ajuste perfecto.
- 5) Depositar la arena sobre el tamiz superior.
- 6) Colocar la tapa al conjunto y asegurarlo con la correa dispuesta para tal fin.
- 7) Vibrar el conjunto durante un tiempo de 10-15 min.
- 8) Concluido el tiempo de agitación, quitar la cubierta y, comenzando con el tamiz superior, extraer la cantidad de arena por él retenida.
- 9) Pesar y registrar, en una hoja de análisis preparada para tal fin, la cantidad

retenida.

- 10) Retirar la arena en el tamiz siguiente, pesar y registrar de igual forma que en el paso anterior.
- 11) Continuar el mismo procedimiento para los tamices restantes hasta llegar a la bandeja final.
- 12) Convertir a porcentaje los pesos obtenidos en los pasos anteriores, tomando como 100% el peso inicial de la muestra.
- 13) Multiplicar el porcentaje retenido en cada tamiz por el factor correspondiente a cada uno, el cual se indica en la hoja de análisis granulométrico Tabla 5.
- 14) Sumar los productos parciales de las anteriores multiplicaciones para obtener el producto total.
- 15) Dividir el producto total sobre la sumatoria de los porcentajes retenidos en cada tamiz, para obtener el número de finura.
- 16) Hacer un gráfico de distribución con los datos obtenidos, colocando en el eje X el número de orden del tamiz y en el eje Y el porcentaje retenido en cada tamiz y uniendo los puntos obtenido.

Tabla 5. Formato para la presentación de resultados del ensayo granulométrico (Norma DIN)

TAMIZ ORDEN DE ABERTURA	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (g)	%RETENIDO A	FACTOR F	A*F
1	1,400			6	
2	1,000			9	
3	0,710			15	
4	0,500			25	
5	0,355			35	
6	0,250			45	
7	0,180			60	
8	0,125			81	
9	0,009			118	
10	0,063			164	
11	Bandeja			275	

4.1.4 Ensayo de compactabilidad

- 1) Tomar una muestra representativa de arena previamente tamizada.
- 2) Llenar a ras el tubo porta-probeta.
- 3) Dar tres golpes de un peso determinado desde una altura fija (condiciones estándar del equipo).
- 4) La altura que descenderá la masa de arena dentro del tubo porta-probeta respecto a la inicial sin comprimir, se tomará como el porcentaje o índice de compactabilidad.

Para la disposición de los equipos anteriormente mencionados, se remodelará la zona adjunta al laboratorio con un mesón que permita la ubicación de los equipos, con sus respectivas conexiones eléctricas, instalación de agua y aislado del ambiente exterior para evitar el deterioro de los equipos.

4.2 FABRICACIÓN DEL METAL BASE

En cuanto a las materias primas empleadas para la fabricación del metal base, proponemos la construcción de un piso de concreto para el acero, además pesar el acero y evitar el uso de recipientes tarados para preparar las cargas del cubilote.

4.3 TRATAMIENTO DE INOCULACIÓN Y ESFEROIDIZACIÓN

Con el objetivo de desarrollar un nuevo control en el tratamiento de inoculación y esferoidización se propone comprar un dinamómetro para medir con mayor exactitud el peso del metal base que se va a tratar.

4.4 OPERACIÓN DEL CUBILOTE

Para aumentar la velocidad del soplo de aire en las toberas y concentrar la zona de fusión se propone que la inclinación de las toberas no inicie en el refractario sino antes de entrar en el horno, aconsejando una inclinación con respecto a la pared del horno de aproximadamente 15% (8°), para evitar pérdidas de velocidad debidas al cambio de dirección. Es importante también verificar la potencia del ventilador ya que de este también depende la velocidad del soplo de aire. Debido a la forma de las toberas (rectangulares) se dificulta su limpieza durante la marcha del cubilote y su reparación, por lo tanto se propone cambiar su geometría y hacerlas circulares.

4.5 METAL TRATADO

Para conocer las propiedades mecánicas del hierro nodular fabricado se deberán hacer periódicamente ensayos de tracción para determinar la resistencia del material de acuerdo a la norma ASTM A 536.

Las dimensiones de la probeta de composición no son las más adecuadas, y para dar solución a este problema se modificarán las dimensiones de la probeta disminuyendo su tamaño, para esto se deberá cambiar la coquilla que se usa actualmente.

4.6 REGISTRO FOTOGRÁFICO



Figura 9. Materiales para el ensayo de arcillas



Figura 10. Desviadores verticales y agitador eléctrico



Figura 11. Equipo de lavado de arcillas



Figura 12. Antigua balanza



Figura 13. Balanza digital



Figura 14. Tamizadora



Figura 15. Equipo de compactabilidad



Figura 16. Situación inicial. Pérdida de material



Figura 17. Terminación del piso de concreto para el acero



Figura 18. Coquilla de Composición



Figura 19. Dinamómetro



Figura 20. Zona de la Planta Física a remodelar



Figura 21. Iniciación de la obra



Figura 22. Mesón terminado



Figura 23. Instalación de equipos

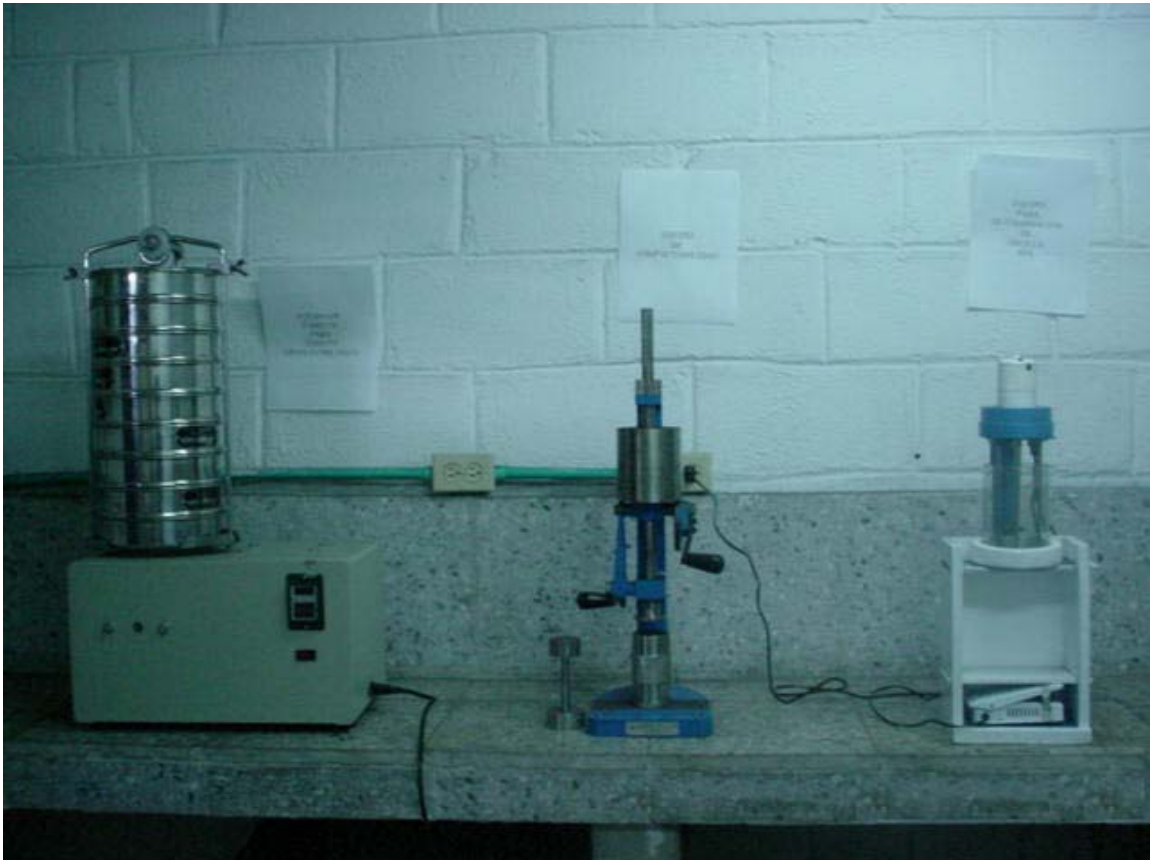


Figura 24. Laboratorio de arenas

5. RESULTADOS

5.1 PREPARACIÓN DE ARENA EN VERDE

Se realizaron ensayos de permeabilidad y resistencia a la compresión los cuales se desarrollaron de la siguiente forma:

Se preparó la mezcla, muestra A de arena habitual usada para moldeo en máquina, denominada arena única la cual cumple funciones tanto de arena de contacto como de relleno, los materiales y proporciones utilizados fueron los siguientes:

Arena usada	300 kg.
Bentonita	2 kg.
Carbonilla	2 kg.

Tabla 6. Resultados preliminares de los ensayos hechos a la muestra A

% HUMEDAD	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	PERMEABILIDAD
1.5%	Mayor a 18.7	60.5
2%	Mayor a 18.7	65.37
2.5%	Mayor a 18.7	79.13
3%	Mayor a 18.7	93.7
3.5%	Mayor a 18.7	120.28
4%	Mayor a 18.7	136.69
4.5%	Mayor a 18.7	136.6
5%	18.7	130.7
5.5%	18.5	128.67
6%	18	125.68

5.1.1 Ensayos realizados a la mezcla de arena utilizada para el moldeo muestra B

Tabla 7. Ensayos hechos a la muestra B en el Laboratorio de Arenas de HIDROMAC S.A.

Propiedad	Resultado
Compactabilidad	42 %
Resistencia a la compresión	>18.7 lb./pulg ²
Humedad	8%
Contenido de arcilla convencional AFS	21.9 % AFS
Índice de finura	76.95 AFS

Tabla 8. Análisis granulométrico hecho a la muestra B en el Laboratorio de Arenas de HIDROMAC S.A. (Norma AFS)

Núm. Equiv. de la serie EUA	W RETENIDO (g)	% RETENIDO A	FACTOR F	A*F
20	0.8	1.6	10	16
30	0.8	1.6	20	32
40	4.3	8.6	30	258
50	7.8	15.6	40	624
70	9.2	18.4	50	920
100	7.35	14.7	70	1029
140	2.15	4.3	100	430
200	1.4	2.8	140	392
270	1.75	3.5	200	700
Fondo	2.4	4.8	300	1440
Totales		75.9		5841

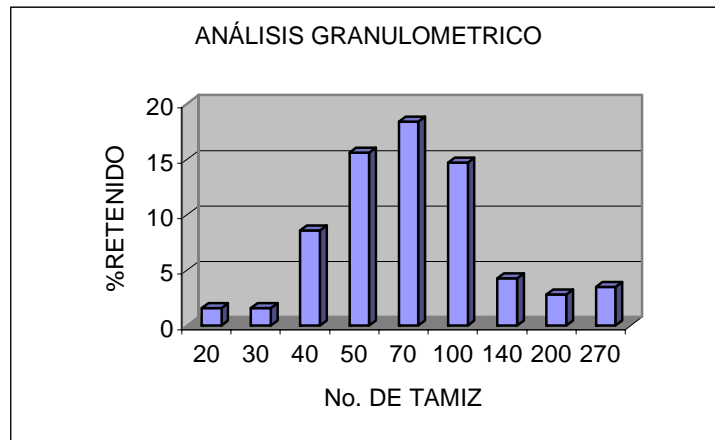


Figura 25. Distribución granulométrico de la muestra B ensayo hecho en el Laboratorio de Arenas de HIDROMAC S.A.

Posteriormente se hizo este mismo análisis en el Laboratorio de Arenas de Fundiciones de Metales de Lima Ltda. para corroborar los datos.

Tabla 9. Ensayos hechos a la muestra B en el Laboratorio de Arenas de Fundiciones de Metales De Lima Ltda.

Propiedad	Resultado
Compactabilidad	46%
Resistencia a la compresión	No se cuenta con el equipo
Humedad	7%
Contenido de arcilla convencional AFS	22.4 % AFS
Índice de finura	74.13 AFS

Tabla 10. Análisis granulométrico hecho a la muestra B en el Laboratorio de Arenas de Fundiciones de Metales De Lima Ltda. (Norma DIN)

Tamiz Serie DIN		W RETENIDO (g)	% RETENIDO A	FACTOR F	A*F
No. Orden	Abertura (mm)				
1	1.400	0.53	1.06	6	6.36
2	1.000	0.44	0.88	9	7.92
3	0.710	1.95	3.9	15	58.5
4	0.500	1.82	3.64	25	91
5	0.353	3.40	6.8	35	238
6	0.250	10.81	21.62	45	972.9
7	0.180	6.84	13.68	60	820.8
8	0.125	5.99	11.98	81	970.38
9	0.090	2.82	5.64	118	665.52
10	0.063	1.75	3.5	164	574
Fondo		2.45	4.9	275	1347.5
Totales		38.80	77.6		5752.88

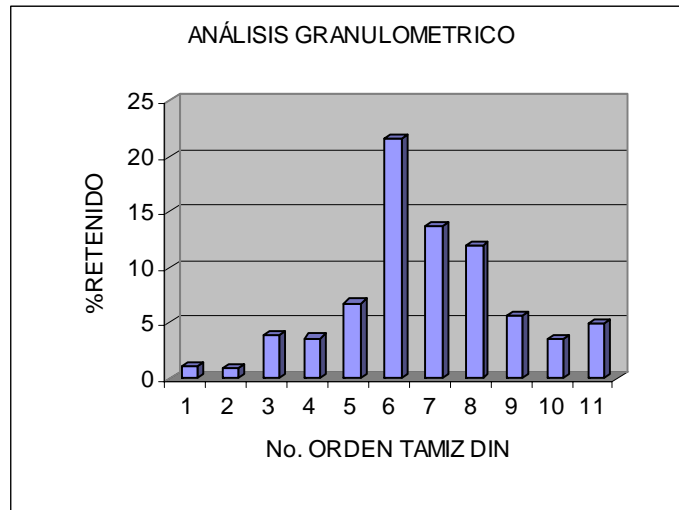


Figura 26. Distribución granulométrica de la muestra B, ensayo hecho en Fundiciones de Metales De Lima Ltda.

De acuerdo con el índice de finura obtenido la arena de moldeo se puede clasificar como de grano medio, de acuerdo con:

Tabla 11. Clasificación de las arenas de acuerdo al índice de finura (Norma AFS)

INDICE DE FINURA	CLASIFICACIÓN
< 50	Guesa
50-110	Media
> 110	Fina

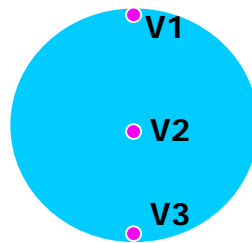
Se puede observar en los dos análisis granulométricos que la arena presenta una buena distribución granulométrica ya que está distribuida en tres tamices.

5.2 OPERACIÓN DEL CUBILOTE

Se tomaron medidas de la velocidad del aire (con el cubilote en funcionamiento) a la salida del ventilador, en la caja de viento superior e inferior y en las toberas inferiores, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 12. Medidas de la velocidad del aire en el circuito

Ubicación de la medición	V1 (m/s)	V2(m/s)	V3(m/s)
Salida del ventilador	24	20.2	5.2
Toberas inferiores	13.1	10.8	5.8
Caja de viento inferior	9.15	21.7	3.77
Caja de viento superior	16.5	14.29	14.48



V1 y V3 son mediciones tomadas cerca de las paredes de las tuberías, mientras que V2 es una medición hecha en el centro de la misma. Las medidas se tomaron con el diafragma del ventilador ubicado en 7.

Con el promedio de estas velocidades (V1, V2 y V3) y el área de la tubería se hicieron los correspondientes cálculos del caudal de aire para la salida del ventilador y así verificar si coincidían o no con la tabla que proporciono el fabricante del ventilador.

Tabla 13. Caudal de aire en la tubería con un área de 0.0735 m² y posición del diafragma en 7

Caudal de aire m ³ /min.		Dispersión
Dato proporcionado por el fabricante	Dato encontrado en las mediciones	
77.64	72.6	6.5%

Con el fin de verificar esta medida se calculó el valor del caudal de acuerdo a las columnas del venturi teniendo en cuenta ecuación, numero 3.

$$Q_{inf} = 14.886\sqrt{h \times 1.033}$$

$$Q_{sup} = 8.825\sqrt{h \times 1.033}$$

$$Q_{Total} = Q_{inf} + Q_{sup}$$

El valor promedio de las columnas de agua inferior y superior durante la medición fueron 12.14 y 7.86 cm. de agua respectivamente, con lo que se obtuvieron los datos de caudal mostrados en las tablas 14 y 15

Tabla 14. Características dimensionales y caudales medidos en los venturi superior e inferior.

Venturi	Diámetro de Estrangulación	Diámetro de Tubería	Caudal Medido
Venturi superior	11.6 cm.	20.4 cm.	25.14 m ³ /min.
Venturi inferior	15.4 cm.	30.6 cm.	52.71 m ³ /min.

Tabla 15. Caudal total en la tubería

Caudal de aire m ³ /min.		Dispersión
Dato proporcionado por el fabricante	Dato encontrado en las mediciones	
77.64	77.85	0.27%

Según los datos obtenidos se puede observar que el valor dado por el fabricante es bastante confiable y que se está trabajando con valores reales de caudal.

Luego de varias fundiciones se estableció el valor de las columnas de agua superior e inferior en 2.5 y 10 cm. de agua respectivamente.

Tabla 16. Caudales medidos en los venturi luego de establecer la altura definitiva de las columnas de agua

Venturi	Diámetro de Estrangulación	Diámetro de tubería	Caudal Medido
Venturi superior	11.6 cm.	20.4 cm.	14.182 m ³ /min.
Venturi inferior	15.4 cm.	30.6 cm.	47.84 m ³ /min.
Caudal total			62.02 m ³ /min.

5.3 TRATAMIENTO DE INOCULACIÓN Y ESFEROIDIZACIÓN

Para el cálculo del peso de ferroaleación a utilizar en el tratamiento de esferoidización se realizó por medio de la ecuación 1:

Donde:

$$\begin{array}{l}
 M = 240 \text{ Kg.} \\
 t = 10 \text{ min.} \\
 T = 1412 \text{ }^\circ\text{C}
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} M \\ t \\ T \end{array}} \right\} \text{Condiciones de operación}$$

$$\begin{array}{l}
 S_i = 0.13\% \\
 S_f = 0.02\% \\
 Mg_r = 0.05\%
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} S_i \\ S_f \\ Mg_r \end{array}} \right\} \text{Datos tomados de análisis}$$

$$\begin{array}{l}
 \%Mg_L = 8.5 \\
 R = 40\%
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} \%Mg_L \\ R \end{array}} \right\} \text{Datos tomados de la ficha técnica de la ferroaleación}$$

$$KgFerroaleación = 240 * \left[\frac{0.75 * (0.13 - 0.02) + 0.05 + (10 * 0.001)}{\frac{(40 * 8.5)}{100}} \right] * \left(\frac{1412}{1450} \right)^2$$

$$Kg. Ferroaleación = 9.5 Kg.$$

Las muestras metalográficas fueron tomadas de los bebederos y los ataques que conformaban el sistema de alimentación de la pieza, estas eran escogidas al azar teniendo la precaución de tener su respectivo análisis espectrométrico para relacionar la microestructura con la composición.

Durante cada fundición se tomaban aproximadamente tres muestras metalográficas para su análisis; cuando se iniciaron las modificaciones del peso de ferroaleación se escogía una pieza para análisis metalográfico cada dos tratamientos, de las cuales se escogieron las más representativas ya que reportar el total de análisis espectrométricos y metalográficos sería demasiado tedioso e innecesario.

A continuación se presentan los resultados obtenidos al final de la experiencia:

5.3.1 Antes de ajustar el peso de ferroaleación

Tabla 17. Análisis espectrométrico hecho a una muestra de fundición nodular empleando 9.5 Kg. de Ferroaleación y 240 Kg. de metal base

Elemento	Porcentaje
Carbono	3.0627
Manganeso	0.08276
Silicio	2.3660
Fósforo	0.14376
Azufre	0.01755
Magnesio residual	0.09850
Cobre	0.25802
Aluminio	0.01468

Tabla 18. Características del grafito en una muestra metalográfica de fundición nodular correspondiente a la composición mostrada en la tabla 17

Características del grafito	
Porcentaje de grafito	9.81
Diámetro del grafito	2.26e-2
Clasificación del tamaño del grafito (ISO 945-1975)	7
Factor de Forma	0.86
Densidad del nódulo de grafito	164
Redondez del nódulo de grafito	1.09

Tabla 19. Distribución de fases en una muestra metalográfica de fundición nodular correspondiente a la composición mostrada en la tabla 17

Fases y microconstituyentes	
Porcentaje de perlita	44.62
Porcentaje de ferrita	45.56

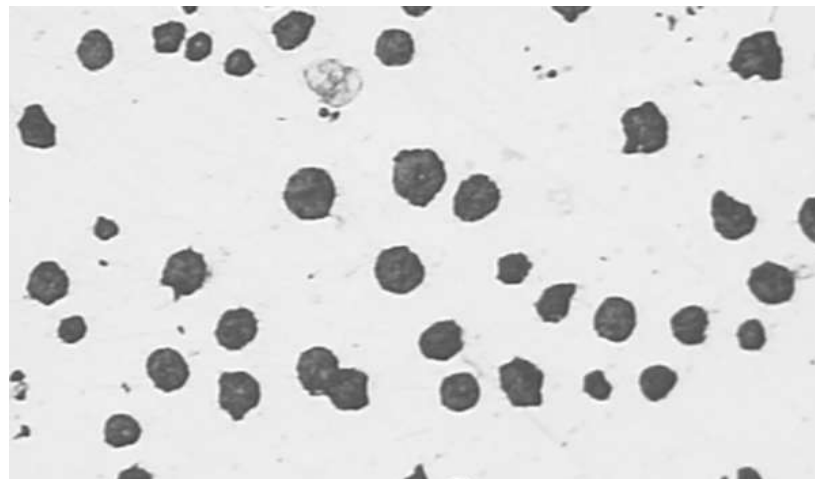


Figura 27. Microestructura de fundición nodular sin ataque, aumento 10X correspondiente a la composición mostrada en la tabla 17

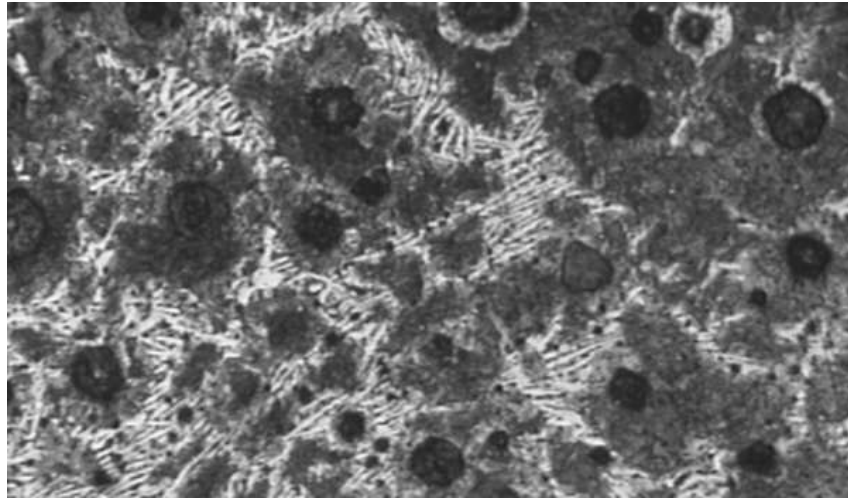


Figura 28. Microestructura de fundición nodular con ataque aumento 10x correspondiente a la composición mostrada en la tabla 17

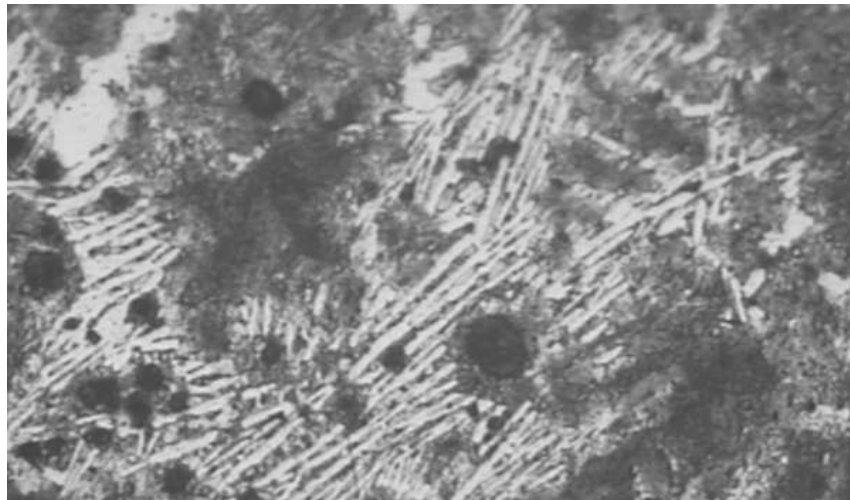


Figura 29. Microestructura de fundición nodular con ataque aumento 20x correspondiente a la composición mostrada en la tabla 17

5.3.2 Resultado final

Tabla 20. Análisis espectrométrico hecho a una muestra de fundición nodular empleando 7.2 Kg. de Ferroaleación y 240 Kg. de metal base

ELEMENTO	PORCENTAJE
Carbono	3.3374
Manganeso	0.19344
Silicio	2.7070
Fósforo	0.06854
Azufre	0.00989
Magnesio residual	0.05346
Cobre	0.1545

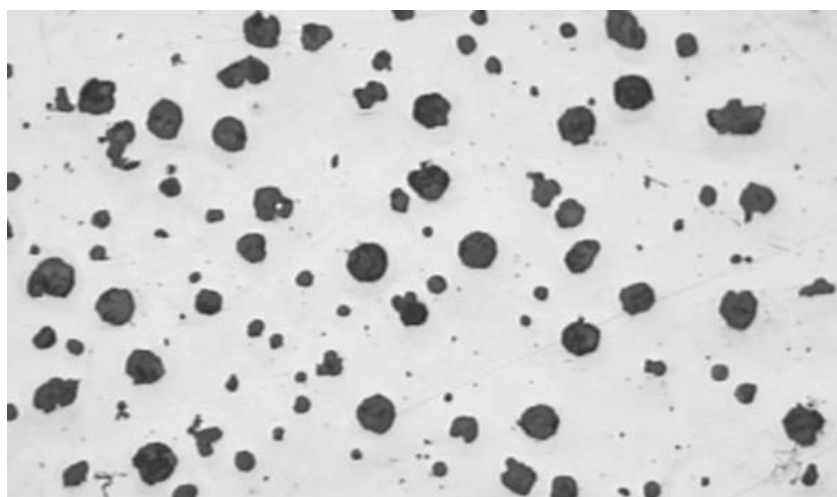


Figura 30. Microestructura de fundición nodular sin ataque 10X correspondiente a la composición mostrada en la tabla 20

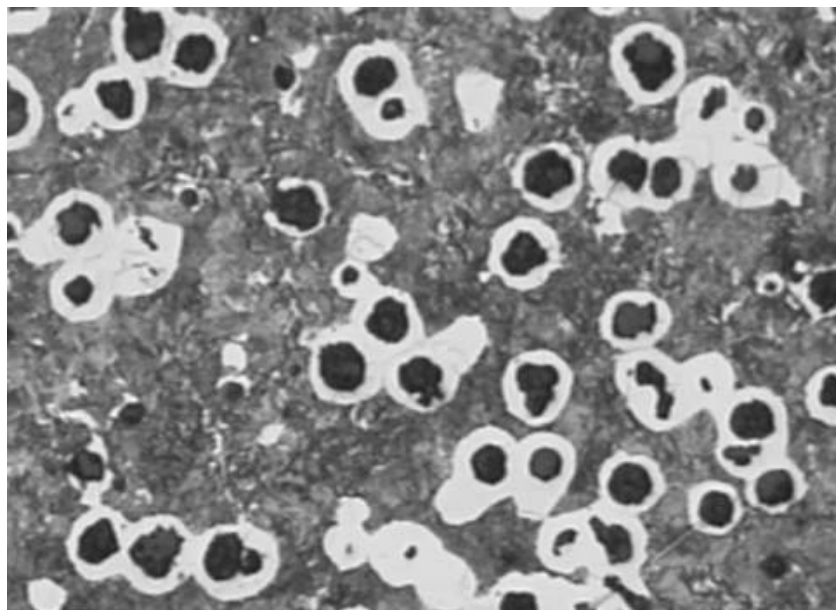


Figura 31. Microestructura de fundición nodular con ataque 10X correspondiente a la composición mostrada en la tabla 20

Tabla 21. Características del grafito en una muestra metalográfica de fundición nodular correspondiente a la composición mostrada en la tabla 20

Características del grafito	
Porcentaje de grafito	10.026
Diámetro del grafito	1.62e-2 mm
Clasificación del tamaño del grafito (ISO 945-1975)	7
Factor de Forma	0.87
Densidad del nódulo de grafito	329
Redondez del nódulo de grafito	1.09

Tabla 22. Distribución de fases en una muestra metalográfica de fundición nodular correspondiente a la composición mostrada en la tabla 20

Fases y microconstituyentes	
Porcentaje de perlita	75
Porcentaje de ferrita	15

Se puede ver en la microestructuras que no se presentan carburos que puedan perjudicar las propiedades del metal, por lo tanto se estableció este peso de ferroaleación como el mejor para obtener buenas propiedades mecánicas y una microestructura propia de un hierro nodular. Las propiedades mecánicas obtenidas se muestran a continuación.

5.4 METAL TRATADO

Para comprobar las propiedades mecánicas de la fundición nodular luego de fijar el peso de ferroaleación y conseguir una microestructura libre de carburos se hicieron ensayos de tracción que arrojaron los siguientes resultados:

Tabla 23. Propiedades mecánicas del hierro nodular correspondiente a la composición de la tabla 20

Probeta No	Resistencia a la tracción (PSI.)	% elongación
1	80220.37	5
2	76637.94	5.9
3	80713.50	7.1

6. ANALISIS DE RESULTADOS

- ★ De acuerdo con las experiencias se pudo determinar que el peso requerido de ferroaleación (8.5%Mg) para un peso 240 Kg. de metal base es de 7.2 Kg. con el cual se logra obtener una microestructura libre de carburos que perjudiquen las propiedades mecánicas de la fundición nodular; se estableció a su vez un rango de peso de ferroaleación de 7.1-7.4 Kg. por debajo de cual se presenta grafito vermicular debido a la deficiencia de magnesio residual lo que ocasiona una esferoidización insuficiente, como se aprecia en la siguiente micrografía.

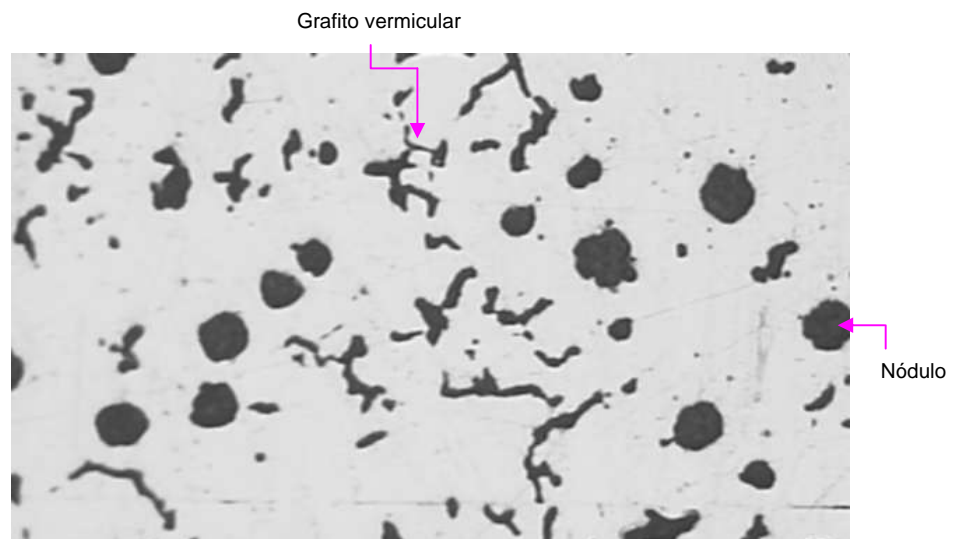


Figura 32. Microestructura de fundición nodular con grafito vermicular sin ataque, aumento 10x

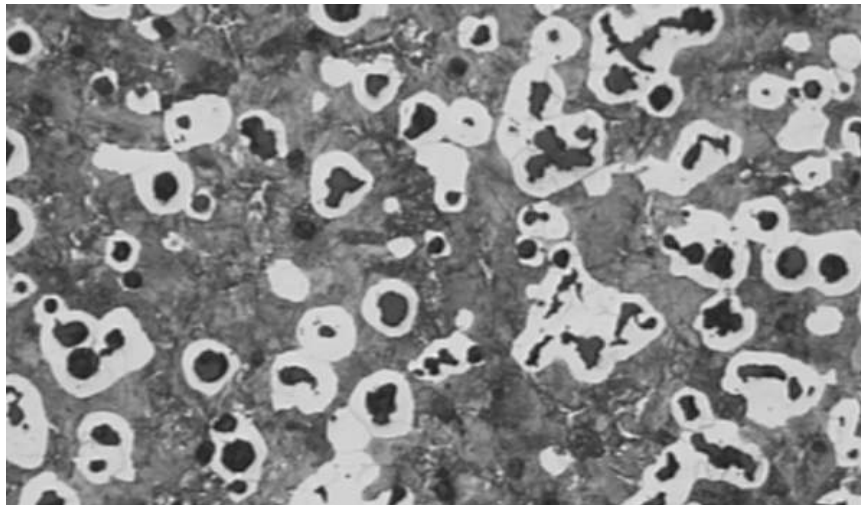


Figura 33. Microestructura de fundición nodular con grafito vermicular con ataque, aumento 10x

Por encima de 7.4 Kg. de ferroaleación el magnesio residual en exceso actúa como estabilizador de carburos promoviendo la formación de carburos primarios en piezas de sección delgada ó restringiendo la formación de estructura ferrítica en piezas de sección gruesa, corriendo también el riesgo de formación de espumas y escorias con la consecuencia de poros en las piezas fundidas.

- ★ Analizando los resultados de composición química y propiedades mecánicas podemos observar que no cumplen con las especificaciones de la norma (ASTM A 536-84 Grado 80-55-06) las cuales se muestran en el **Anexo C**.

En cuanto a la composición, elementos como el carbono, el cobre y el manganeso están por debajo del rango establecido por la norma, el bajo porcentaje de carbono puede deberse a la mala calidad del coque usado en la fundición y la mala carburación del horno que puede ser causa de la baja temperatura en la zona de carburación.

Contrario a esto el fósforo se encuentra por encima del rango permitido, una de las principales causas de esto puede ser el hecho que siempre al preparar las cargas metálicas se usa retorno y no chatarra de nodular nueva, como el retorno es alto en fósforo, elemento que no tiene pérdidas por ignición su porcentaje se incrementa, y este a su vez puede ser una de las causas de la baja ductilidad del metal.

Observando las propiedades mecánicas del material este tiene en promedio 79190.6 PSI. de resistencia a la tracción y 6% de elongación, valores que son muy próximos a los especificados por la norma, sin embargo, dos de las probetas ensayadas tienen un porcentaje de elongación por debajo del establecido y una de ellas no alcanza el límite de la resistencia a la tracción, lo que puede ser consecuencia de que no tienen la composición adecuada.

- ★ Como se observó en los resultados obtenidos en los análisis realizados a la arena de moldeo hay un exceso de bentonita en el circuito de arenas (aprox. 22.15%) que puede ser el resultado de una adición constante de 2 Kg. de bentonita a la mezcla sin ningún análisis previo de su porcentaje de arcilla, ya que en algunas ocasiones es posible que se necesite una menor cantidad de bentonita para alcanzar un porcentaje de arcilla deseado, otra posible causa de este exceso es un porcentaje de finos considerable que puede observarse en las gráficas granulométricas mostradas anteriormente, lo que afecta la resistencia y permeabilidad de la mezcla de arena así como también el costo de preparación de la arena debido a la cantidad de material aglutinante que será necesario para producir las propiedades deseadas.

Sin embargo, es posible que se necesite una alta resistencia ya que la fundición nodular necesita moldes rígidos para resistir su doble contracción durante la solidificación, es necesario un estudio más profundo al circuito de

arenas para determinar el verdadero contenido de arcilla que se necesita así como también la resistencia más apropiada.

★ Comparando las propiedades de las arenas mostradas en las tablas 7 y 9 se tienen para cada medida las siguientes dispersiones entre los datos:

- Compactabilidad 9.5%
- Humedad 12.5%
- Arcilla AFS 2.3%
- Índice de Finura 3.4%

En el caso de las dos primeras propiedades (compactabilidad y humedad) se observa que la dispersión es grande, lo cual puede ser consecuencia de que la arena no se empacó herméticamente al transportarla al otro laboratorio para realizar el ensayo.

En el caso del porcentaje de arcilla AFS y el índice de finura la dispersión no es muy alta, lo cual indica que el equipo construido es confiable para realizar el ensayo de lavado de arena.

En general la diferencia entre los datos obtenidos puede ser causa de que las balanzas usadas en ambos laboratorios no tienen la misma precisión, una de ellas es digital y la otra manual.

★ Con respecto a la probeta utilizada para el análisis de composición esta se modificó y se le dieron las medidas aconsejadas en la bibliografía, sin embargo no se apreció un cambio notable en las lecturas de composición con respecto a la probeta anteriormente usada, sin embargo se obtuvo una mejoría en cuanto a la facilidad de extracción de la probeta, y por lo tanto el análisis de composición se podía hacer en un tiempo más corto, a continuación presentamos análisis hechos con dada una de las probetas:

Tabla 24. Composiciones de la fundición nodular para cada probeta de análisis espectrométrico

Probeta	%C	%Si	%Mn	%Cu	%S	%Mg	%P
Probeta con las dimensiones originales	3.18	2.67	0.082	0.042	0.0047	0.048	0.085
Probeta con las nuevas dimensiones	3.12	2.66	0.079	0.039	0.0041	0.047	0.084

- ★ Comparando las mediciones de caudal hechas por una empresa externa y lo calculado de acuerdo con la altura de las columnas de agua de los venturi, con el dato proporcionado por el fabricante, se tiene una dispersión de 6.5% y 0.27% respectivamente lo que demuestra la confiabilidad de los datos obtenidos por medio de la lectura de los venturi.
- ★ De acuerdo a datos teóricos y bibliografía consultada para un diámetro interno de cubilote entre 800mm. y 1000mm. la velocidad del aire debe ser de aproximadamente 20m/seg. y comparándola con la velocidad obtenida en las mediciones hechas (9.9m/seg.) podemos ver que es muy baja con respecto a la requerida, lo que favorece la formación de una zona de combustión periférica que perjudica la marcha del cubilote. Es posible que una de las causas de esta baja velocidad del aire sea que el número de toberas que posee el cubilote (6 toberas) excede el recomendado en la bibliografía, de acuerdo con el diámetro del cubilote que es 3 toberas, aunque otros autores recomiendan un número mayor de toberas el hecho que se presente una velocidad tan baja del aire es un indicativo de que posiblemente hay un mal diseño del circuito, otra causa posible es que el ventilador no tiene la potencia necesaria para vencer las pérdidas de presión que se originan en el cubilote y en el circuito de aire.

7. CONCLUSIONES

- ✦ Se mejoró el control de calidad sobre el metal base en la preparación de las cargas del cubilote, al sustituir la medida volumétrica de la carga de acero por pesada en una balanza romana, lo que da seguridad del peso real y permite predecir con mayor exactitud, por medio de cálculos matemáticos, la composición aproximada del metal base que se obtiene.
- ✦ Las mejores condiciones para el tratamiento de esferoidización son un peso de ferroaleación (8.5% Mg) de 7.2 Kg. peso de metal 240 Kg. lo que garantiza la obtención de fundición nodular libre de carburos y sin presencia de grafito vermicular.
- ✦ Existe una deficiencia en el diseño del circuito de aire ya que no cumple con la velocidad del aire en las toberas establecida para el diámetro del cubilote ni con el número de toberas aconsejado para este.
- ✦ Con el control del peso de metal base a tratar, se disminuyen los riesgos de fragilización de la fundición nodular, causada por un peso insuficiente de metal base con respecto al peso de ferroaleación fijado, y se previene la formación de grafito vermicular por un exceso de metal base con respecto al peso de la ferroaleación.
- ✦ Por medio de la evaluación hecha a los controles de calidad de la empresa, lo que comprendió caracterización, diagnóstico y propuesta de nuevos controles se contribuyó a mejorar la calidad de la fundición nodular tanto en su microestructura como en su composición química y propiedades mecánicas.

8. RECOMENDACIONES

- ✦ Se recomienda que el Departamento de Control de Calidad no esté subordinado a otros departamentos para que pueda ejercer sus funciones eficazmente sobre las materias primas y el producto terminado. La persona que está a cargo del Departamento de Calidad debe estar presente en todos los procesos relacionados con la fabricación de piezas en fundición nodular.
- ✦ Se recomienda estimular al trabajador proporcionándole un entorno adecuado de trabajo con las herramientas necesarias y generar buena comunicación por parte de los jefes hacia los trabajadores para que contribuyan como parte esencial del proceso de control de calidad.
- ✦ Para controlar mejor la marcha del cubilote se recomienda verificar la potencia del ventilador y hacer nuevas mediciones de velocidad y caudal del aire a la salida del ventilador y en las toberas para determinar si el ventilador es el más adecuado para las características del cubilote.
- ✦ Con el objetivo de aumentar la velocidad del aire en las toberas, se recomienda que la inclinación de estas no empiece en la pared del horno sino antes de entrar en este (15%, 8°), para evitar que el aire que entra perpendicularmente al cubilote cambie de dirección bruscamente y pierda velocidad, además beneficiar la observación de las gotas de metal que es un control tecnológico de la fusión que no se hace.
- ✦ Ya que se cuenta con el Laboratorio de Arenas se recomienda realizar un estudio de la mezcla de arena para determinar la proporción óptima de cada componente que permita obtener las propiedades más adecuadas para el proceso.

- ✦ Debido a que el porcentaje de arcilla convencional AFS está conformado por arcilla muerta, arcilla activa, polvos en la arena base o formados por el reciclado este ensayo no permite conocer el contenido real de arcilla activa en la mezcla, por lo tanto se recomienda realizar el ensayo de azul de metileno para determinar este porcentaje y en caso que se presente un exceso adicionar arena nueva.
- ✦ Según el análisis granulométrico hecho se observa un porcentaje de finos considerable el cual afecta las propiedades de la mezcla, se recomienda utilizar algún método para su eliminación como la aireación.

9. APORTES

9.1 Arenas

- ✦ Se construyó el equipo de lavado de arcilla de acuerdo con las especificaciones técnicas de la AFS (motor 7500 rpm, dimensiones del vaso y desviadores verticales) y actualmente presta un importante servicio a la empresa al permitir realizar el ensayo de lavado para la determinación del porcentaje de arcilla convencional AFS, además se verificó su buen funcionamiento comparando los resultados de contenido de arcilla que se obtuvieron lavando la arena con el equipo construido, con un equipo de lavado de arena del SENA de Bogotá.
- ✦ Se cumplió el objetivo de adecuar y equipar el Laboratorio de Arenas en Fundiciones de Metales De Lima Ltda. para controlar las propiedades de la mezcla de arena tales como compactabilidad, granulometría, porcentaje de humedad, índice de finura y contenido de arcilla AFS.

9.2 Proceso

- ✦ Se logró vincular a los trabajadores en la aplicación del control de calidad ya que pesar el metal base era responsabilidad de ellos mismos, creando conciencia de la importancia de obtener un producto de buena calidad en beneficio de la empresa.
- ✦ Con la construcción del piso para el acero se logró disminuir las pérdidas de material ya que proporciona una base firme para su almacenamiento, evitando que se mezcle con arena y otras impurezas que pueden llegar a perjudicar el

control del peso de las cargas metálicas. El cual influye directamente sobre el control de calidad del metal base.

9.3 Aspecto económico

Gracias a la reducción del peso de la ferroaleación usado en el proceso de esferoidización se logró además de mejorar la calidad metalúrgica del metal disminuir el costo de inversión en la materia prima.

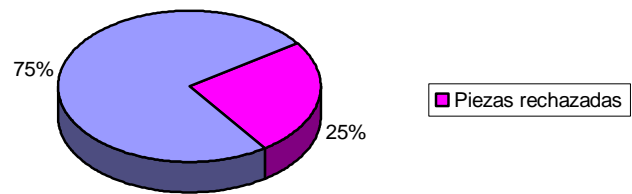
Costo por kilogramo de ferroaleación \$5100.

Tabla 25. Análisis de costos

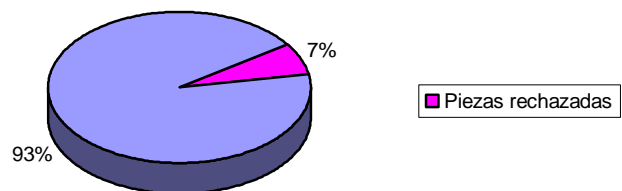
COSTOS	PESO DE FERROALEACIÓN		AHORRO
	11 Kg	7.2 Kg	
Por tratamiento	\$56.100	\$36.720	\$19.380
Por día (18 tratamientos)	\$1'009.800	\$660.960	\$348.840
Por mes (24 días hábiles)	\$24'235.200	\$15'863.040	\$8'372.160
Por año (12 meses)	\$290'822.400	\$190'356.480	\$100'465.920
% De piezas rechazadas por fragilidad	25%	7%	

La inversión inicial fue de \$6.240.000 que corresponde al costo del dinamómetro, inversión que fue recuperada en el primer mes donde el ahorro fue de \$8.372.160







**Figura 34. PIEZAS RECHAZADAS POR FRAGILIDAD
(11 Kg. de ferroaleación)**



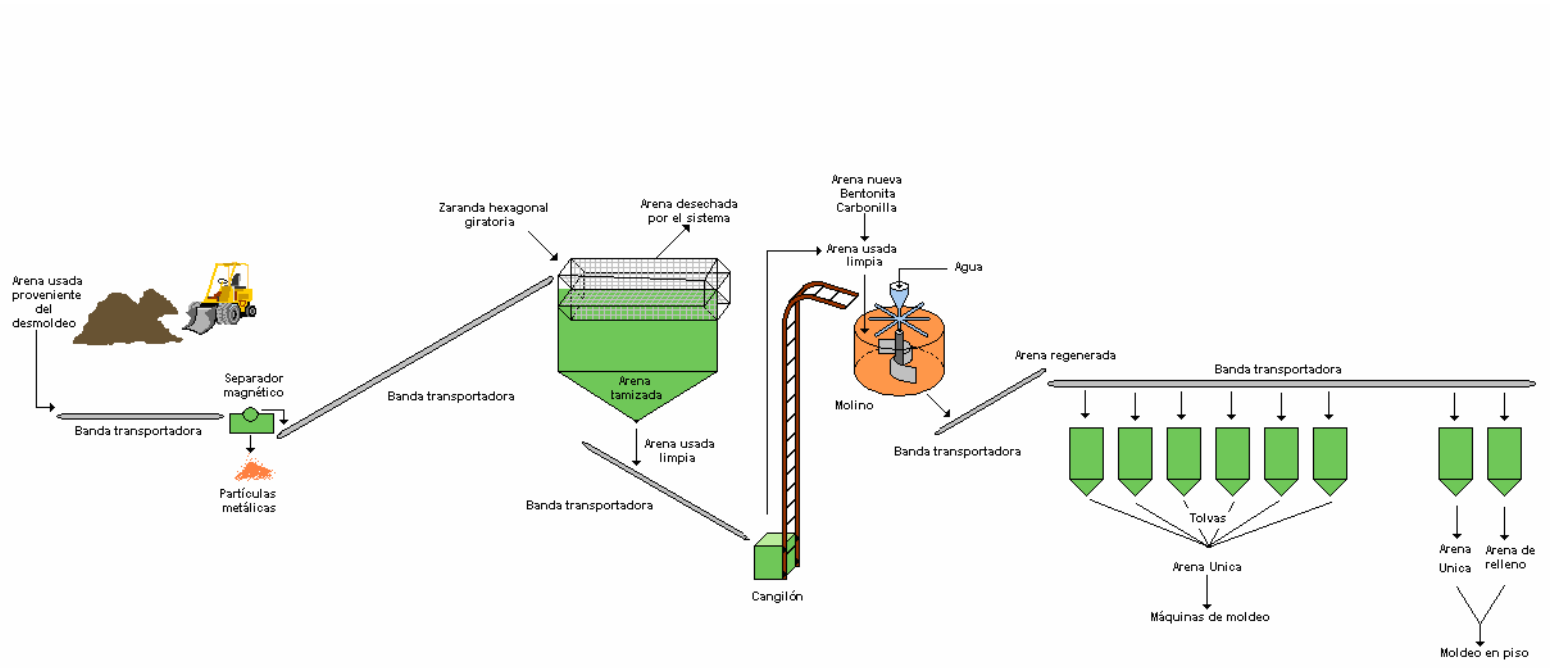
**Figura 35. PIEZAS RECHAZADAS POR FRAGILIDAD
(7.2 Kg. de ferroaleación)**



BIBLIOGRAFÍA

-  ALONSO BAQUERO, Arnaldo. Diseño Operación y Control del Cubilote. Bucaramanga: Ediciones UIS, 2000. p. 35-49, 65-69, 111-116.
-  ESTADOS UNIDOS. Illinois. Manual de Arenas para Fundición. American Foundrimens`s Society INC. 1967. p. 5-18
-  ESTADOS UNIDOS. Illinois. Ductile Iron Handbook. American Foundrimens`s Society INC.1993. p. 21, 70-88.
-  CANADA. Control Básico de las Arenas en Verde. Centre de Métallurgie du Québec. p. 1-17.
-  Manual para el Control de Calidad en Arenas de Moldeo, Corrección Mejora y Mantenimiento. SENA. p. 125-140.
-  Control de Calidad de las Arenas. From Internet: < URL: http://www.moderncasting.com/Spanish/arena_verde.pdf.

ANEXO A Circuito de arenas



ANEXO C.

SUMARY OF USED DUCTILE IRONS

SPECIFICATION NUMBER	CLASS OR GRADE	MIN TENSILE STRENGTH PSI	MIN YIELD STRENGTH PSI	ELONGATION IN 2 IN, %	HEAT TREATMENT	OTHER REQUIREMENTS
ASTM A536-84	60-40-18	60.000	40.000	18	MAY BE ANNEALED	CHEMICAL COMPOSITION IS SUBORDINATE TO MECHANICAL PROPERTIES, HOWEVER, THE CONTENT OF ANY CRTIES; HOWEVER CHEMICAL ELEMENT MAY BE SPECIFIED BY MUTUAL AGREEMENT.
	65-45-12	65.000	45.000	12	USUALLY AS CAST	
	80-55-06	80.000	55.000	6	USUALLY AS CAST	
	100-70-03	100.000	70.000	3	USUALLY NORMALIZED	
	120-90-02	120.000	90.000	2	QUENCHED AND TEMPERED	
SAE J434C	D-4018				MAY BE ANNEALED	HARDNESS, Bhn, 170 MAX
	D-4512					156-217
	D-5506					187-255
	D-7003				MAY BE NORMALIZED	241-302
	DO&T				QUENCHED AND TEMPERED	RANGE SPECIFIED
ASTM A395-88						COMPOSITION, %
						TC Si P OTHER CE Bhn
ASME SA395	60-40-18	60.000	40.000	18	FERRITIZED BY ANNEALING Bhn 143-187	MIN 3.0
ASTM A476-82					TO BE USED IN AS-CAST CONDITION HARDNESS SHALL BE MINIMUM Bhn 201	MAX 2.5 0.08
	80-60-03	80.000	60.000	3		MIN 3.0
MIL-i-24137	(REPLACED BE MIL-C-24707-F THAT SPECIFICES ASTM A395 GRADE 60-45-15)					MAX 2.5 0.08
ASTM A445-API604	60-40-18	60.000	40.000	18	HEAT TREATED TO FERRITIC STRUCTURE	MIN 3.0
AMS 5315						MAX 2.5 0.08
ASM 5316		60.000	45.000	15	ANNEALED	MIN 3.2 1.7
		80.000	60.000	3		MAX 4.0 2.5 0.08 0.8
AGMA 244.02	165	65.000	45.000	10	ANNEALED	MIN 3.2 1.7
	180	70.000	55.000	7		MAX 4.0 2.5 0.08 0.8
	210	85.000	70.000	5		
	225	89.000	75.000	4		
	255	103.000	87.000	3		
	265	107.000	92.000	2		
	285	115.000	100.000	1.5		
	300	123.000	105.000	1		
	350	143.000	123.000	0.5		
	180	98.000	75.000	7		
	210	105.000	82.000	6		
	255	115.000	90.000	4		
	265	120.000	95.000	3.5		
	285	130.000	105.000	3		
	300	135.000	110.000	2.5		
	350	158.000	130.000	1		
	AWWA C151	PRESURE PIPE 60-42-10	60.000	42.000	10	IMPACT 7 ft.lbs

TYPICAL CHEMICAL COMPOSITIONS RELATED TO MECHANICAL PROPERTIES OF UNALLOYED AND LOW-ALLOY DUCTILE IRONS

CHEMICAL COMPOSITION	GRADE 60-40-18	GRADE 65-45-12	GRADE 80-55-06	GRADE 100-70-03	GRADE 120-90-02
CARBON	3.50-3.90	3.50-3.90	3.50-3.90	3.50-3.80	3.50-3.80
SILICON	2.20-3.00	2.50-2.80	2.20-2.70	2.20-2.70	2.20-2.70
MANGANESE	0.30 MAX	0.40 MAX	0.20-0.50	0.60 MAX	0.60 MAX
★PHOSPHORUS	0.05 MAX	0.05 MAX	0.05 MAX	0.05 MAX	0.05 MAX
SULFUR	0.015MAX	0.015MAX	0.015MAX	0.015 MAX	0.015 MAX
CHROMIUM	0.06 MAX	0.10 MAX	0.10 MAX	0.10 MAX	0.10 MAX
NICKEL	-	-	-	★★	★★
COPPER	-	-	0.20-0.40	0.20-0.50	0.20-0.50

★ For optimum elongation and impact properties, phosphorus should not exceed 0.03% and silicon should be kept as low possible.

★★ Nickel additions of up to 1% may be used to enhance strength properties.

