



**ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS QUE INFLUENCIAN LA APARICIÓN DE
DEFECTOS DE FUNDICION EN LAS CAMISAS CENTRIFUGADAS DE LA
LINEA INDUSTRIAL EN INDUSTRIAS LAVCO**

NATALIA RODRIGUEZ GALVIS

**FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO – QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
Bucaramanga, Abril del 2008**

**ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS QUE INFLUENCIAN LA APARICIÓN DE
DEFECTOS DE FUNDICION EN LAS CAMISAS CENTRIFUGADAS DE LA
LINEA INDUSTRIAL EN INDUSTRIAS LAVCO.**

Proyecto de grado para optar el título de Ingeniera Metalúrgica

Presentado por:

NATALIA RODRIGUEZ GALVIS

Director del Proyecto:

Ing. Arnaldo Alonso Baquero

Tutor del Proyecto:

Luís Armando Vesga

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

2008

DEDICATORIA

A Dios que siempre me ilumino y dio la fuerza para seguir adelante.

A mis padres Rafael y Janneth, por su apoyo incondicional y comprensión.

A mis hermanos Carolyn y Richard, por su paciencia.

A Cesar Sánchez por su compañía y ayuda mutua.

A mis familiares por cada reunión a la que no pude asistir.

A mis amigos y compañeros que de una u otra forma hicieron parte de esto.

Natalia Rodríguez Galvis

AGRADECIMIENTOS

Al Ingeniero Luís Emilio Forero por la oportunidad y la confianza.

Al ingeniero Arnaldo Alonso Baquero por su disponibilidad y asesoría.

A Industrias LAVCO Ltda por abrirme las puertas.

A Luís Armando Vesga por su confianza y ayuda.

A Carlos Sánchez por su colaboración y por resolverme las dudas.

A los técnicos por su paciencia y colaboración.

A mis amigos por cada uno de los momentos vividos.

Y a todas aquellas personas que de alguna manera u otra hicieron posible la

realización de este libro y no fueron mencionadas.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCION	17
1. OBJETIVOS	19
1.1 OBJETIVO GENERAL	19
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
2. JUSTIFICACION DEL PROYECTO.	20
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	21
4. RESEÑA HISTORICA.	22
5. FUNDAMENTACION TEORICA.	24
5.1 FUNDICIÓN CENTRIFUGA.	24
5.2 PRINCIPIOS FUNDAMENTALES.	25
5.2.2. Solidificación y Alimentación.....	27
5.2.3. Inclusiones	30
5.3 LAS TÉCNICAS DE PRODUCCIÓN	30
5.3.1 Fundición Centrifuga real o pura.....	31
5.3.1.1 Producción de tubos largos.....	31
5.3.1.2 Producción de bujes.....	32
5.3.2 Fundición semicentrífuga y a presión.....	34
5.3.3 Aplicaciones típicas de fundiciones centrifugas.....	36
5.4 VARIABLES DE PROCESO Y CALIDAD DE FUNDICIÓN.	36
5.4.1 Velocidad de rotación.....	36
5.4.2 Temperatura de colada.....	37
5.4.3 Velocidad de colada.....	37
5.4.4 Temperatura del molde.....	37
5.5 CARACTERÍSTICAS DE LA FUNDICIÓN CENTRIFUGA.	38

5.5.1 Estructura y propiedades.....	38
5.6 DEFECTOS TÍPICOS EN LA FUNDICIÓN CENTRIFUGA.....	38
5.6.1 Segregación y “banding”	39
5.6.2 Eutéctico fosforoso binario.....	41
5.6.3 Lluvia de metal.....	41
5.6.4 Variación en el espesor de pared.....	42
5.6.5 Forma del grafito debido a las inclusiones.....	42
5.6.6 Burbujas de aire.....	44
5.6.7 Vibración.....	45
5.6.8 Grumos.....	45
5.7 INOCULACION.....	46
5.7.1. Tipos de inoculantes.....	46
5.7.1.1 Inoculante base grafito.....	46
5.7.1.2 Aleaciones de Ferrosilicio.....	47
5.7.1.3 Calcio. Silicio.....	47
5.7.2 Tamaño de grano del inoculante.....	48
5.7.3 Selección del inoculante.....	48
5.7.3.1 FeSiCa.....	48
5.7.3.2. FeSiCaBa.....	48
5.7.3.3. FeSiSr o FeSiCaCe.....	48
5.7.4 Tipo de adición del inoculante.....	48
5.7.4.1. Inoculación en la cuchara.....	49
5.7.4.2 Inoculación en la piqueta.....	49
5.7.5 Cantidad de adición.....	49
6. PROCESO DE FABRICACIÓN DE LAS CAMISAS CENTRIFUGADAS.....	50
6.1 MATERIA PRIMA.....	50
6.1.1 Carga metálica.....	50
6.1.2 Ferroaleaciones.....	51
6.1.3 Inoculantes.....	52
6.1.3.1 Inoculante IM 22.....	52

6.1.3.2. Inoculante ferrosilicio.	52
6.1.4 Carga no metálica.	53
6.1.5 Unto refractario	53
6.2 SELECCIÓN DE LA CARGA	55
6.3 PREPARACIÓN DE LA CARGA	55
6.4 FUSIÓN	56
6.5 MOLDEO	57
6.5.1 Máquina Centrifuga.....	57
6.5.2 Colada y llenado	58
6.5.3 Solidificación y enfriamiento.....	59
6.5.4 Extracción	60
7. DESARROLLO EXPERIMENTAL	62
7.1 DETALLES ESTADÍSTICOS DE LA PRESENCIA DE LOS DEFECTOS	62
7.2 METALOGRAFÍA DE LA PROBETA	70
7.3 DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX).....	71
7.3.1. Preparación y Montaje de la muestra.....	71
7.3.2. Toma de datos de difracción	72
7.3.3 Identificación de fases.....	72
7.4 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM).....	73
7.4.1. Preparación de la muestra	73
7.4.2. Toma de datos	73
8. ANALISIS DE LAS PROBETAS	74
8.1 ANÁLISIS METALOGRÁFICO	74
8.2 ANÁLISIS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX).....	76
8.3 ANÁLISIS DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM)	79
8.3.1 Región sin mancha	79
8.3.2 Región de interfase	80
8.3.3 Región con mancha	82
9. PRUEBAS REALIZADAS.	84
9.1 SISTEMA DE LLENADO	84

9.2 CANTIDAD DE SILICIO	86
10. RESULTADOS	88
11. ANALISIS DE RESULTADOS.....	92
12. CONCLUSIONES	94
13. RECOMENDACIONES.....	95
14. PROTOCOLO DE ACTIVIDADES PARA MINIMIZAR LA APARICIÓN DE LOS DEFECTOS.....	96
BIBLIOGRAFIA	98

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Relación entre la fuerza de rotación y el diámetro para varias magnitudes del factor G	27
Figura 2. Relación de tolerancia de mecanizado con la geometría de la fundición. (Cumberland)	29
Figura 3. Esencial de la máquina de fundición de tubos	31
Figura 4. La capa para la producción de tubos largos: (a) lanza de rocío. (b) la textura de superficie	32
Figura 5. Esencial de la máquina centrífuga del eje horizontal y del montaje de dado centrífugos para la producción de bujes cortos	33
Figura 6. Tipo de canal del vertedero utilizada en la colada centrífuga de eje horizontal	34
Figura 7. Máquina de fundición centrífuga con eje para colada vertical (Thornton)	34
Figura 8. Disposiciones típicas de la cabeza para del alimentador en la fundición semicentrífuga. a) cabeza central conectada a la fundición de diámetro pequeño. b) cabezas de segmento aplicado a fundiciones de diámetro más grande	35
Figura 9. Montaje refractario del molde la fundición centrífuga de eje vertical componentes formados	35
Figura 10. Eutéctico fosforoso binario	41
Figura 11. Vista superficial de la inclusión	43
Figura 12. Inclusión revelada por la prueba de tintas	43
Figura 13. a) y b) Burbujas de aire	44
Figura 14. Grumos en el metal	45
Figura 15. Tanque mezclador de pintura y pistola de roceado	54

Figura 16. Horno cubilote.....	56
Figura 17. Maquina centrifuga previa al llenado	58
Figura 18. Inicio de llenado.....	59
Figura 19. Llenado a 10 seg	59
Figura 20. Llenado a 18 seg	59
Figura 21. Llenado total a 49 seg.....	59
Figura 22. Inicio de solidificación	60
Figura 23. Solidificación a 6 min	60
Figura 24. Solidificación a 8 min	60
Figura 25. Solidificación a 10 min	60
Figura 26. Inicio de extracción	61
Figura 27. Extracción a 40 seg	61
Figura 28. Extracción a 33 seg	61
Figura 29. Extracción a 1 min	61
Figura 30. Corte longitudinal de la camisa centrifugada	64
Figura 31. Pestaña sin mecanizar.....	64
Figura 32. Mecanizado a 6 mm.....	64
Figura 33. Mecanizado a 7 mm.....	65
Figura 34. Mecanizado a 7 mm.....	65
Figura 35. Mecanizado a 8 mm.....	65
Figura 36. Mecanizado a 10 mm.....	65
Figura 37. Mecanizado a 11 mm.....	65
Figura 38. Mecanizado a 13 mm.....	65
Figura 39. Sin mecanizado	66
Figura 40. Mecanizado a 2 mm.....	66
Figura 41. Mecanizado a 4 mm.....	66
Figura 42. Mecanizado a 6 mm.....	66
Figura 43. Mecanizado a 10 mm.....	66
Figura 44. Mecanizado a 10 mm.....	66

Figura 45. Mecanizado a 11 mm.....	67
Figura 46. Mecanizado a 13 mm.....	67
Figura 47. Zona sin mecanizar.....	67
Figura 48. Mecanizado a 1 mm.....	67
Figura 49. Mecanizado a 2 mm.....	67
Figura 50. Mecanizado a 3 mm.....	67
Figura 51. Mecanizado a 8 mm.....	68
Figura 52. Mecanizado a 9 mm.....	68
Figura 53. Mecanizado a 10 mm.....	68
Figura 54. Mecanizado a 12 mm.....	68
Figura 55. Corte transversal para obtener la probeta	71
Figura 56. Sección de la probeta para análisis	71
Figura 57. Portamuestras de Aluminio.....	72
Figura 58. Sección sin ataque a 100x.....	75
Figura 59. Sección atacada con picral 4% a 500x	75
Figura 60. Sección sin ataque a 100x.....	75
Figura 61. Sección atacada con picral 4% a 500x	75
Figura 62. Sección sin ataque a 100x.....	76
Figura 63. Sección atacada con picral 4% a 500	76
Figura 64. Micrografía en la región sin mancha toma 1	79
Figura 65. Micrografía en la región sin mancha toma 2	80
Figura 66. Micrografía en la interfase toma 1.....	81
Figura 67. Micrografía en la interfase toma 2.....	81
Figura 68. Micrografía en la región de la mancha toma 1	82
Figura 69. Micrografía en la región de la mancha toma 2	83
Figura 70. Sistema de llenado original.....	84
Figura 71. Sistema de llenado modificado	85
Figura 72. Sin mecanizar	88
Figura 73. Mecanizado a 2 mm.....	88

Figura 74. Mecanizado a 4 mm.....	89
Figura 75. Mecanizado a 6 mm.....	89
Figura 76. Mecanizado a 10 mm.....	89
Figura 77. Mecanizado a 11 mm.....	89
Figura 78. Mecanizado a 13 mm.....	89
Figura 79. Sección de la parte Exterior 140x	90
Figura 80. Sección antes del centro 140x	90
Figura 81. Sección de la parte Exterior 140x	91
Figura 82. Sección antes del centro 140x	91
Figura 83. Sección de la parte Interior 140x	91

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Composición química aproximada de algún tipo de chatarra de hierro colado y acero.....	51
Tabla 2. Ferroaleaciones	51
Tabla 3. Inoculantes.....	53
Tabla 4. Condiciones de operación de las camisas fabricadas.....	62
Tabla 5. Condiciones de operación de las camisas defectuosas.....	63
Tabla 6. Distribución de defectos. Zona 1	68
Tabla 7. Distribución de defectos. Zona 2.....	69
Tabla 8. Distribución de defectos. Zona 3.....	69
Tabla 9. Composición Química	86
Tabla 10. Distribución de defectos. Zona 2.....	90

RESUMEN

TITULO: ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS QUE INFLUENCIAN LA APARICIÓN DE DEFECTOS DE FUNDICIÓN EN LAS CAMISAS CENTRIFUGADAS DE LA LINEA INDUSTRIAL EN INDUSTRIAS LAVCO.*

AUTOR: NATALIA RODRIGUEZ GALVIS**

PALABRAS CLAVES: Fundición centrífuga, inoculación, sistema de llenado, defectos, unto refractario.

DESCRIPCIÓN: Industrias LAVCO Ltda, fabrica camisas centrifugadas a nivel industrial y es la única empresa en Colombia que suministra para las compañías petroleras más importantes, los cilindros centrifugados para los grandes motores estacionarios de bombeo de crudo, entre cuyas aplicaciones más importantes están las líneas Allen y Sulzer, sin embargo, estas piezas presentan defectos como poros y manchas, que incide en el numero de rechazos y en demoras en el tiempo de entrega.

El objetivo de este trabajo es establecer los factores causantes de la aparición de defectos de fundición en las camisas centrifugadas en la linea industrial, y para lograrlo, se realizaron un analisis de las variables que intervienen en el proceso y pruebas de caracter operativo, como modificaciones en el sistema de llenado y en el contenido de silicio en la fundición.

Los análisis de metalografía óptica, SEM y DRX permitieron establecer la naturaleza de las fases presentes, la forma y distribución de los defectos. El estudio de estos defectos permitieron concluir que: la variable de mayor influencia en la aparición de los defectos es el sistema de llenado y en segundo término, la preparación y la aplicación del unto merece especial cuidado y debe ser lo más estable térmicamente posible para impedir el desprendimiento del material.

* Trabajo de grado. Modalidad práctica empresarial.

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, Director: Arnaldo Alonso Baquero.

SUMMARY

TITLE: ANALYSIS OF THE PARAMETERS THAT INFLUENCE THE APPEARANCE OF DEFECTS OF FOUNDRY IN THE SHIRTS CENTRIFUGED OF THE INDUSTRIAL LINE IN INDUSTRIES LAVCO.*

AUTHOR: NATALIA RODRIGUEZ GALVIS**

KEY WORDS: Centrifugal casting, inoculation, filling system, defects, Refractory painting.

DESCRIPTION: LAVCO Industries Ltda, manufactures shirts centrifuged to industrial level and is the only company in Colombia which provides for the most important petroleum companies, the cylinders centrifuged for the big stationary engines of pumping crude oil, between whose more important applications are the lines Allen and Sulzer, nevertheless, these pieces present faults as pores and blemishes, which affects in the number of rejections and delays in delivery of time.

The objective of this work is to establish the factors behind the appearance of defects of foundry in shirts centrifuged in the industrial line, and to achieve it, there was realized an analysis of the variables involved in the process and operational test character, as modifications in the filling system and the silicon content in the smelting.

The analyses of optical metallography, SEM and DRX allowed to establish the nature of the present phases, shape and distribution of defects. The study of these defects allowed conclude that: the variable of grater influence in the appearance of defects is the filling system and in the second term, the preparation and application of unto deserves special care and must be as stable possible to prevent the detachment of the material.

* Work of Degree. Enterprise practical modality.

**Faculty of Physical-chemistries Engineerings, Metallurgical Engineering School and Materials Science, Director: Arnaldo Alonso Baquero.

INTRODUCCION

La fundición centrífuga es el proceso más usado en la fabricación de tubos; actualmente ha tenido un gran desarrollo al superar sus primeros inconvenientes al establecer la fuerza centrífuga necesaria en la aplicación práctica, a la fabricación de gran cantidad de productos que pueden ser fabricados por este método.

El proceso fue adoptado por industrias LAVCO para la fabricación de camisas centrifugadas, en general de la línea industrial; en la actualidad son líderes en la industria metalmeccánica de Santander por tal motivo el siguiente estudio tiene como finalidad mejorar el proceso de centrifugación para disminuir los porcentajes de rechazo, aumentar la calidad y productividad, estableciendo las posibles causas de los defectos que se están presentando en la línea industrial desde hace varios años.

Este trabajo fue realizado como requisito para optar al título de ingeniera metalúrgica, en la modalidad de práctica industrial desarrollando actividades de observación, diagnóstico y aplicación de correctivos en la fabricación de camisas centrifugadas en la línea industrial. Por consiguiente, en este documento queda registrado el procedimiento ejecutado en dicha empresa y que consistió en el desarrollo de las siguientes fases: fase 1 conocimiento de la empresa y su proceso industrial, fase 2 diagnóstico de las deficiencias encontradas en el proceso de fabricación de las camisas, fase 3 diseño y aplicación de los correctivos propuestos y fase 4 la elaboración del protocolo.

Es preciso destacar la vinculación de la universidad a procesos productivos como el de industrias LAVCO cuya actividad contribuye al desarrollo metalmeccánico del

departamento y a su vez, facilita el desarrollo personal y profesional de los estudiantes, contribuyendo con la aplicación de los conocimientos teóricos, científicos de mi carrera en la participación al mejoramiento de procedimientos técnicos que se realizan.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

- ❖ Establecer los factores causantes de la aparición de defectos de fundición en las camisas centrifugadas en la línea industrial de LAVCO.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ❖ Valorar las variables del proceso que contribuyen a la formación de los defectos de fundición (poros, zonas duras y brillantes) en las camisas centrifugadas de industrias LAVCO.
- ❖ Establecer mediante microscopía óptica y electrónica (SEM) y difracción de rayos x (DRX) la composición química y la morfología de las fases presentes.
- ❖ Establecer y documentar un plan de acción de mejora identificando las actividades que se deben ejecutar para minimizar la aparición de poros y manchas.

2. JUSTIFICACION DEL PROYECTO

La implementación de nuevas tecnologías y la mejora de los procesos actuales, en nuestro caso de la industria fundidora y metalmeccánica, representan un importante campo para la aplicación del conocimiento ingenieril y a su vez, sirve como puente para la interacción de la universidad con la industria.

Con el análisis de las variables implícitas en el proceso de centrifugado de camisas de la línea industrial, se busca establecer los factores causantes de los defectos originados en el proceso de fabricación de las camisas en la empresa LAVCO, en todas sus etapas; con el fin de disminuir los errores en el proceso, de manera que se evalúen las variables para determinar el correcto proceder en pro de disminuir los porcentajes de rechazo, reducir los costos de operación, mejorar la calidad y aumentar la productividad.

La aparición aproximada de un porcentaje de poros y/o áreas duras y brillantes en las camisas centrifugadas en industrias LAVCO, tienen un efecto negativo en la entrega oportuna de los pedidos de estas piezas. Esto afecta el costo de fabricación, la productividad y la ganancia de la empresa. El presente proyecto tiene por objeto dar una respuesta positiva para la eliminación de los defectos mencionados, con el fin de dar soluciones a estos factores económicos que están induciendo a una pérdida en tiempo, mano de obra y productividad.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La empresa actualmente fabrica 400 camisas centrifugadas de la línea industrial y 250000 camisas centrifugadas de diferentes tipos en la línea automotriz anualmente. La línea industrial durante su proceso de fabricación presenta defectos típicos de fundición, como puntos duros y brillantes, porosidades, entre otros; que ocasionan un aumento en el costo de fabricación, demoras en las entregas y de competitividad.

Un análisis completo y profundo de la situación actual del proceso permitirá establecer las causas y al mismo tiempo, servirá de soporte para lograr una solución al problema que actualmente se presenta en esta industria; es decir, disminuir el tiempo de entrega de las camisas.

4. RESEÑA HISTORICA

INDUSTRIAS LAVCO LTDA., inició la fabricación de camisas o cilindros para motor, como parte del desarrollo de la labor metalmeccánica realizada por su fundador, Luís Armando Vesga G., con una trayectoria y experiencia de casi cincuenta años en el sector. **LAVCO** nació en el año de 1991, ante la disolución de la razón social anterior que funcionó entre 1975 y 1990.

La empresa de origen familiar y carácter privado, tiene como misión ser una empresa industrial productora y comercializadora de partes para motor, proveedora de servicios de reparación y otros componentes internos relacionados directamente con el desempeño de motores y compresores.

Como visión la empresa será en el 2010, un proveedor líder del mercado colombiano, reconocido en Latinoamérica, por la calidad en los procesos de fabricación y comercialización de partes para motor; así como un ofertante de servicios metalmeccánicos consolidado en los sectores industriales y energéticos que cuente con aliados estratégicos a nivel nacional e internacional, de quienes recibamos inversión en transferencia de conocimiento, tecnología y capital.

Cuenta con una importante participación dentro del mercado colombiano y venezolano, y a la vez, con la creciente demanda de sus productos, en otros mercados internacionales: Ecuador, Centroamérica y el Caribe. Es la única empresa en Colombia que suministra para las compañías petroleras más importantes los cilindros centrifugados para los grandes motores estacionarios de Bombeo de Crudo, entre cuyas aplicaciones más importantes están las líneas Allen y Sulzer. De igual manera, se encuentran los clientes a nivel nacional e internacional en los segmentos de: Fabricación de Equipo Original,



Comercialización de partes, Talleres de Rectificación de Motores y Mecánica Industrial Diesel, así como organizaciones del sector Industrial y Energético.

5. FUNDAMENTACION TEORICA

5.1 FUNDICIÓN CENTRIFUGA

El rasgo esencial de la fundición centrífuga es la introducción del metal fundido en un molde que gira durante el llenado, enfriamiento y la solidificación de la pieza. La fuerza centrífuga juega un papel importante en la eliminación de porosidades durante la solidificación y el enfriamiento de la pieza.

La fuerza centrífuga producida por la rotación es grande, comparada con fuerzas hidrostáticas normales. Actúa de dos modos. En primer término, la fuerza influye en la distribución del metal líquido sobre las superficies externas del molde, formando cilindros huecos y otras formas anulares. El segundo es el desarrollo de alta presión en la fundición durante la solidificación y el enfriamiento. Esto, en unión con la solidificación direccional, ayuda a la alimentación y acelera la separación de inclusiones no metálicas y gases inducidos. Las ventajas del proceso son: facilidad del metal líquido para llenar las formas externas de las piezas y alta calidad metalúrgica del producto.

Existen diferentes tipos de procesos de centrifugación: proceso de centrifugación pura, proceso de centrifugación semicentrífuga y proceso de centrifugación a presión. La centrifugación pura puede ser de eje horizontal, vertical o inclinado y permite obtener piezas de revolución sin machos. La centrifugación semicentrífuga también es de tres ejes pero las piezas de revolución con huecos, se obtienen por machos. La centrifugación a presión es de solo eje vertical y se puede obtener piezas de cualquier forma.

5.2 PRINCIPIOS FUNDAMENTALES

5.2.1 Fuerza Centrifuga. La fuerza centrífuga que actúa sobre un cuerpo en rotación es proporcional al radio de rotación y al cuadrado de la velocidad:

$$F_c = mr\omega^2 = \frac{mv^2}{r}$$

Donde:

F = Fuerza centrifuga(N; pdl)

m= Masa (kg;lb)

r = Radio (m; ft)

w = Velocidad angular (rad/s)

v = Velocidad periférica (m/s; ft/s)

La fuerza gravitacional sobre la misma masa:

$$F_g = mg$$

Donde g = aceleración debido a gravedad (m/s² ft/s²).

De la relación entre la fuerza centrifuga y la fuerza gravitacional se obtiene el factor G:

$$G \text{ factor} = \frac{F_c}{F_g} = \frac{r\omega^2}{g}$$

Expresado en las unidades de velocidad más convenientes de revoluciones por minuto (N), luego la expresión se hace:

$$G \text{ factor} = \frac{r}{g} \left(\frac{\pi}{30} \right)^2 N^2 = \frac{0.011rN^2}{g}$$

$$N = \left(\frac{G \text{ factor} \times g}{0.011r} \right)^{1/2} = 29.9 \left(\frac{G \text{ factor}}{r} \right)^{1/2}$$

$$= 42.3 \left(\frac{G \text{ factor}}{D} \right)^{1/2}$$

Donde D es el diámetro de rotación (m)

Estas relaciones entre la velocidad de rotación, el diámetro y la fuerza centrífuga se ilustran gráficamente en la Figura 1. Ellas permiten seleccionar la velocidad, según la magnitud de la fuerza centrífuga requerida.

Cumberland estableció una gama de velocidades mínimas requeridas. Estas son representadas por la línea de puntos sobrepuesta sobre la Figura 1 y más o menos equivale a una velocidad constante periférica de 0.5 m/s (1000 pies/minutos). La fuerza requerida se disminuye con el aumento del diámetro.

$$\omega^2 = \frac{2gL}{r_t^2 - r_b^2}$$

Donde

L = Longitud axial (m; in)

rt = Radio superior (m; in)

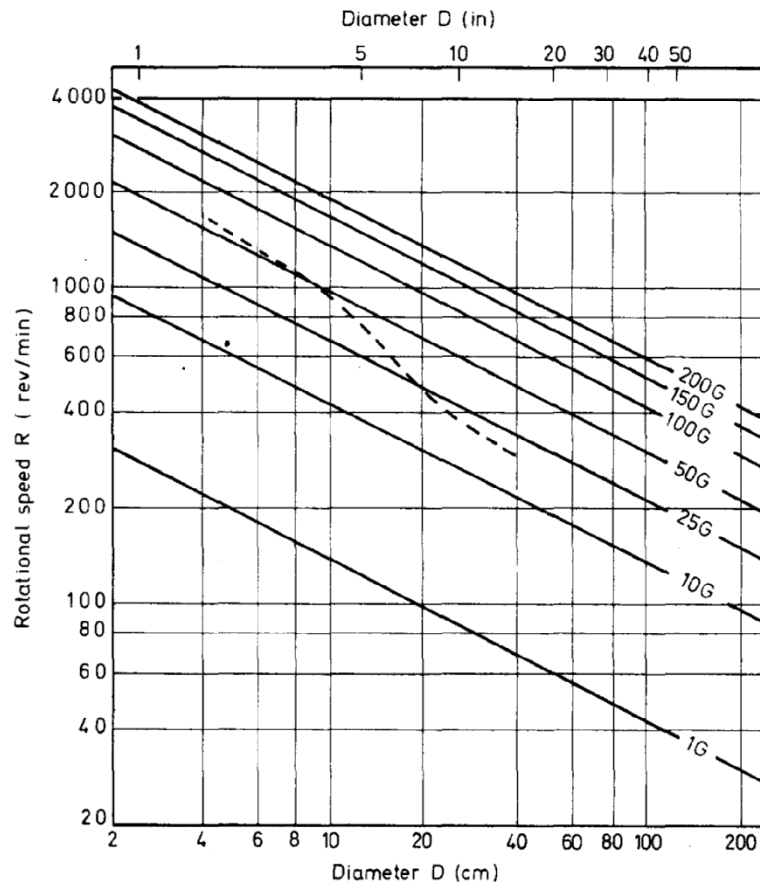
rb = Radio inferior (m; in)

Por lo tanto:

$$N = \frac{30(2g)^{1/2}}{\pi} \cdot \left(\frac{L}{r_t^2 - r_b^2} \right)^{1/2} = 42.3 \left(\frac{L}{r_t^2 - r_b^2} \right)^{1/2}$$

Donde las dimensiones lineales son expresadas en metros.

Figura 1. Relación entre la fuerza de rotación y el diámetro para varias magnitudes del factor G



Otros factores relevantes en la selección de la velocidad son las capacidades mecánicas del equipo y las tensiones generadas en la solidificación de la fundición. Aunque se ha podido exceder el valor de 200G en algunos casos, la mayor parte de los casos se trabaja dentro de la gama de 10-150G. Los valores más altos son usados para los componentes cilíndricos de pequeño diámetro, y los más bajos, para fundiciones semicentrífugas y de presión.

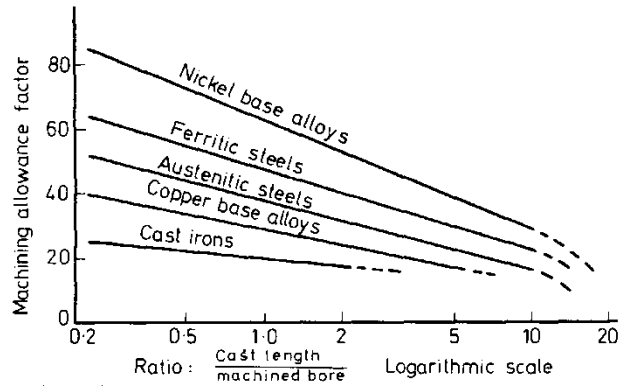
5.2.2. Solidificación y Alimentación. La efectividad de la fuerza centrífuga promueve un alto estándar de calidad metalúrgica de la pieza, al establecer un

modelo controlado de la solidificación, que está gobernado por el proceso usado, por la forma y dimensiones de la pieza.

Si se considera la colada de un cilindro simple, las condiciones pueden ser altamente favorables a la solidificación direccional debido al elevado gradiente de temperaturas radial que se extiende entre el centro y la pared de molde. Bajo estas condiciones, la masa central de metal líquido cristaliza bajo la acción de la fuerza centrífuga que ejerce la función de alimentador. Los gradientes más elevados y las mejores condiciones del enfriamiento ocurren en la zona exterior de la fundición, especialmente cuando se emplea un molde metálico cilíndrico. Otro factor importante es la relación entre la longitud y el diámetro del cilindro, una alta relación reduce al mínimo las pérdidas de calor por radiación y por convección. En estas condiciones, el calor es disipado casi completamente por la pared del molde y el enfriamiento es prácticamente unidireccional hasta la completa solidificación de la pieza.

Cuando se aumenta el espesor de la pared de la pieza, o si la relación de longitud al diámetro se reduce, los gradientes de temperaturas radiales se hacen menos pronunciados. En estas condiciones, una zona de porosidad interna es asociada con el último líquido para enfriarse, normalmente limitado con una delgada banda de metal cerca a la superficie. Para alcanzar un producto final totalmente sano, esta porosidad se suprime con un mecanizado. Por esta razón, una tolerancia apropiada de las dimensiones debe tenerse en cuenta sobre las dimensiones del molde. La Figura 2, muestra el factor recomendado de mecanización según la geometría de la fundición.

Figura 2. Relación de tolerancia de mecanizado con la geometría de la fundición. (Cumberland)



Cuando la longitud excede en 15 al diámetro, el mecanizado es innecesario. El factor de forma es, sin embargo, menos crítico para las fundiciones de pared delgada que solidifican bajo los gradientes de temperaturas inducidos por efecto del enfriamiento inicial del molde.

Fabricar componentes de espesores gruesos y pesados, en los cuales la cavidad del molde es formada totalmente por material refractario (arena aglomerada), presenta un problema diferente. En estos casos no hay enfriamiento direccional. El cabezal del alimentador se coloca en la última región y tiene que ser suficientemente grande para inducir gradientes favorables de temperaturas en todas partes del enfriamiento. La expresión de la presión P proveniente de la rotación es:

$$P = \frac{\rho \omega^2 (r_1^2 - r_2^2)}{2}$$

Donde

ρ = densidad;

ω = velocidad angular;

r_1 = radio de rotación en un punto dado en el líquido;

r_2 = radio del agujero.

5.2.3. Inclusiones. Otra función que ejerce la fuerza centrífuga es hacer que las inclusiones no metálicas segreguen en la superficie interna del cilindro. En la colada estática, la separación de las inclusiones depende de la fuerza neta gravitacional que actúa en cada partícula suspendida, en la fundición centrífuga, esta fuerza es aumentada en el valor rw^2/g .

5.3 LAS TÉCNICAS DE PRODUCCIÓN

Las variaciones en la práctica de esta técnica de moldeo hace referencia en el eje de rotación, tipo de molde y manera de introducción del metal fundido: estos rasgos gobiernan el diseño de máquinas y equipos usados.

En general, las máquinas de eje horizontales son preferidas para las piezas de alta longitud en proporción al diámetro, mientras que para fundiciones de diámetro mayor a su longitud, se usan más comúnmente coladas en eje vertical, aunque existan excepciones en ambos casos.

El material de molde es determinado en parte por la forma y por el número de piezas requeridas. Para formas simples, el moldeo en coquilla metálica, por lo general es preferido sobre el moldeo en materiales cerámicos refractarios. Las coquillas metálicas pueden ser de acero o de hierro fundido, apoyado en una lámina de acero. Ellos son usados con varios tipos de capa para la protección y la facilidad de remoción: sobre las capas de pinturas refractarias se encuentran mezclas que contienen grafito, ferrosilicio y otras sustancias, que sirven tanto como aislantes o inoculantes. Para formas más complejas o para partes

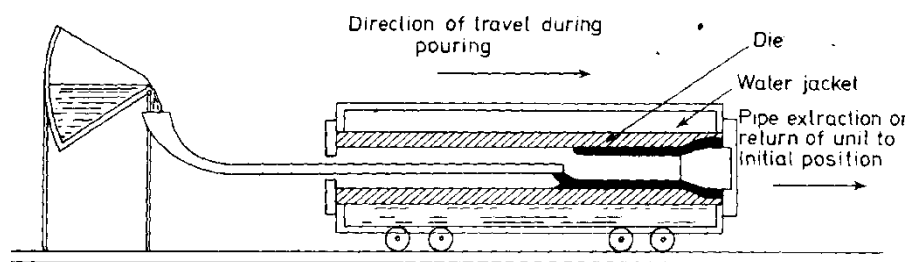
requeridas en pequeñas cantidades, normalmente son usados moldes refractarios cerámicos. Los moldes de grafito también han sido usados para usos especiales.

5.3.1 Fundición Centrifuga real o pura. Como se indico la centrifugación pura permite obtener piezas de revolución huecas sin necesidad de utilizar machos. El uso más amplio de fundición centrifuga es la producción de cilindros huecos, tubos sin costura, camisas y objetos simétricos. Los moldes se cuelan de manera uniforme y mientras que el molde gira sobre su eje de rotación.

5.3.1.1 Producción de tubos largos. La mayoría de los tubos largos son producidos sobre máquinas de eje horizontal, usando moldes de arena o metálicos. Uno de los problemas principales en la producción de tubos largos es alcanzar la distribución uniforme de metal sobre la extensa superficie del molde.

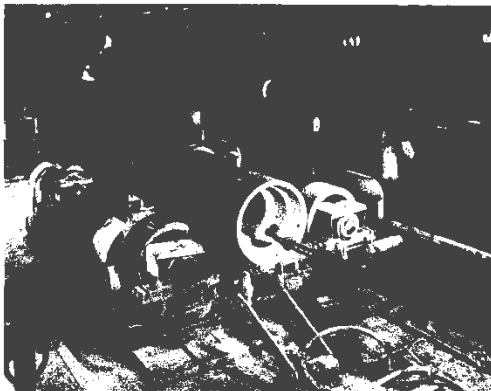
El proceso es ilustrado en la Figura 3, donde un canalón, provisto de una cuchara automática, introduce el metal hasta el extremo del molde. Durante el proceso de vertido el molde que rota, se desplaza por medio de unos rodachines, tal como se muestra en la figura 3, para que el metal progresivamente llene completamente el molde. Cada máquina produce una fundición aproximadamente cada dos minutos.

Figura 3. Esencial de la máquina de fundición de tubos

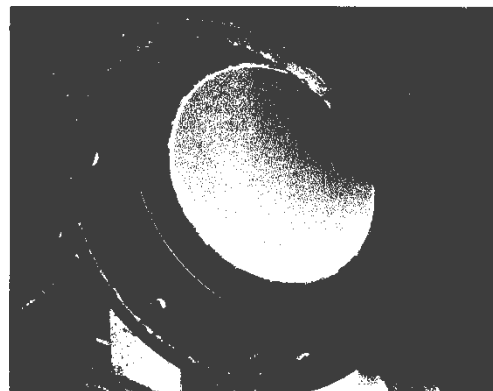


Para obtener velocidades lentas de enfriamiento, en el molde se usan moldes en arena. En este caso, las aleaciones de alta colabilidad pueden ser vertidas sin el sistema retractable de canalón. Existe otro sistema llamado Moore para la producción de tubos de fundición, utilizando moldes que emplean solo un forro de arena. El proceso es sobre todo conveniente para tubos grandes y en cantidades pequeñas. Con frecuencia para mejorar el acabado superficial se usa un revestimiento refractario. La figura 4 muestra la forma para colocar el unto y la fina textura de la capa del revestimiento.

Figura 4. La capa para la producción de tubos largos: (a) lanza de rocío. (b) la textura de superficie



(a)



(b)

5.3.1.2 Producción de bujes. Los bujes de longitud corta pueden ser producidos en máquinas de eje horizontal o vertical. Un tipo de máquina de eje horizontal es ilustrado en la Figura 5. Este principio es usado en la producción de cilindros.

El molde, por lo general, consiste en un dado de metal intercambiable apoyado dentro de un sostenedor de acero. Un material conveniente para el dado en si es

la fundición de hematita, que muestra buena resistencia al choque térmico y a la distorsión.

Varios tipos de mecanismos de colada son usados. Máquinas de eje horizontal son alimentadas comúnmente por una proyección de canalón ajustable por la cubierta al final del ensamble del molde para depositar el metal directamente sobre la pared del dado. Una variación de esta práctica es el uso de un canal de ranura amplia que permita un llenado rápido, Figura 6.

Para bujes de diámetro grande normalmente se prefiere la fundición con eje vertical. En este caso el metal puede ser introducido por un canalón que descarga tangencialmente dentro de la cavidad de molde Figura 7, o puede ser vertido directamente.

Figura 5. Esencial de la máquina centrífuga del eje horizontal y del montaje de dado centrífugos para la producción de bujes cortos

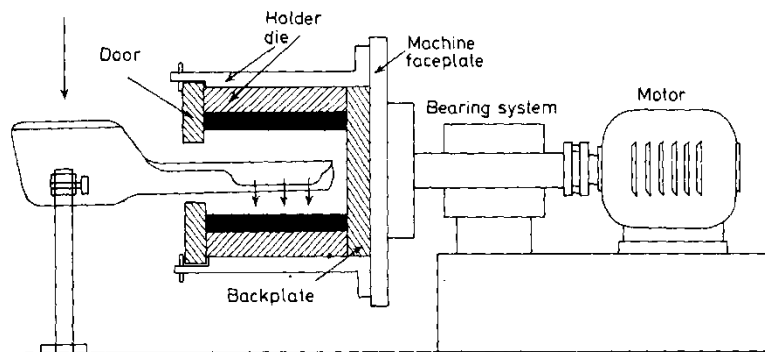


Figura 6. Tipo de canal del vertedero utilizada en la colada centrífuga de eje horizontal

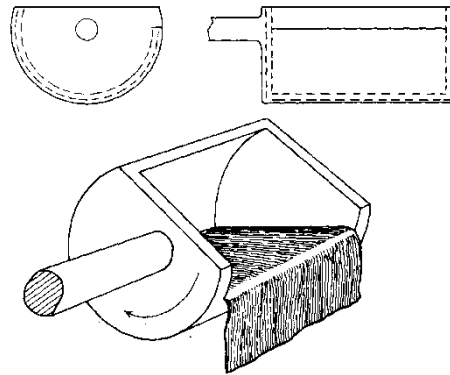
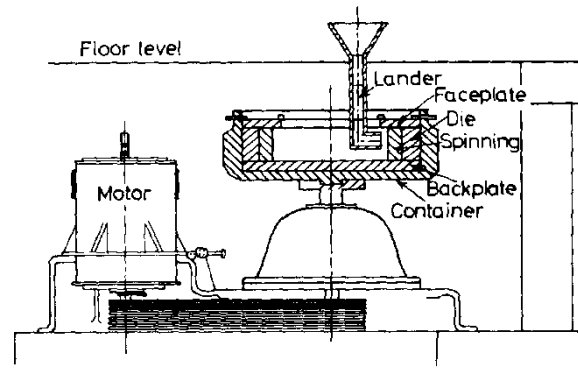


Figura 7. Maquina de fundición centrífuga con eje para colada vertical (Thornton)



5.3.2 Fundición semicentrífuga y a presión. Los componentes de diámetro grande, normalmente son colados en moldes refractarios, en el cual, tanto superficies internas como externas son formados por el refractario. Para las fundiciones de pequeño diámetro interno una sola cabeza central de alimentación delgada es conectada a la fundición, Figura 8a. Las fundiciones de diámetro más grande requieren segmentos separados o anillos, y dependiendo de las dimensiones de estos, pueden comunicarse con el bebedero directamente o por corredores análogos usados en el fundición estática Figura 8b.

Las fundiciones semicentrífugas, normalmente son realizadas sobre máquinas de eje verticales para facilitar el montaje del molde. Un arreglo típico, se ilustra en la figura 9.

Figura 8. Disposiciones típicas de la cabeza para del alimentador en la fundición semicentrífuga. a) cabeza central conectada a la fundición de diámetro pequeño. b) cabezas de segmento aplicado a fundiciones de diámetro más grande

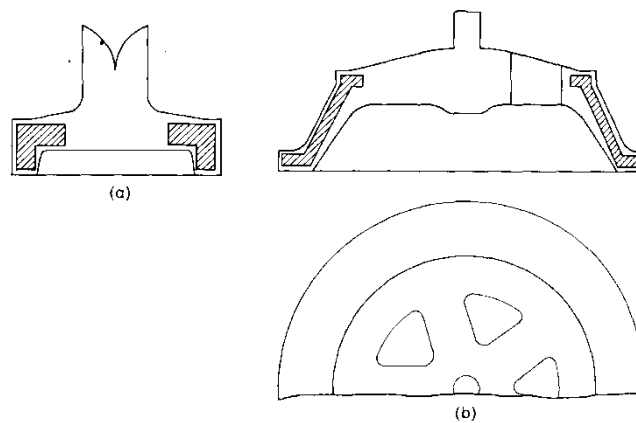
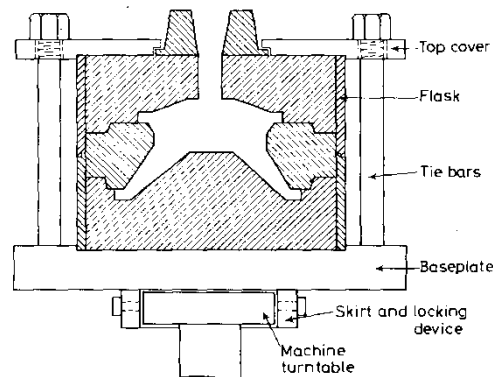


Figura 9. Montaje refractario del molde la fundición centrífuga de eje vertical componentes formados



5.3.3 Aplicaciones típicas de fundiciones centrífugas.

1. Real.	Tubos para agua, gas y aguas residuales. Tubería para reformadores. Tubos radiantes. Tubos para agua de lluvia Cojinetes. Pistón Cilindros. Rodillos de fabricación de papel. Anillos de turbina de gas.	Hierro fundido. Aceros resistentes al calor. Hierro fundido. Aleaciones de cobre. Hierro fundido. Aleaciones de cobre.
2. Semicentrífuga.	Cajas de inyector. Engranajes. Poleas.	Aceros resistentes al calor. Aleaciones de cobre Acero. Acero.
3. Presión.	Bisagras. Soportes. Fundiciones dentales. Joyería.	Acero. Aleaciones de Co-Cr.

5.4 VARIABLES DE PROCESO Y CALIDAD DE FUNDICIÓN

Una vez que el proceso ha sido establecido, las variables principales que controlan la calidad son: la velocidad de rotación, la temperatura de vertido, velocidad de vertido y temperatura del molde.

5.4.1 Velocidad de rotación. Los factores principales que influyen en la selección de velocidad fueron indicados en los fundamentos del proceso. El factor que gobierna la fundición centrífuga real o pura es la obtención del espesor contra la gravedad, evitando la rasgadura longitudinal por la tensión excesiva del aro. En fundiciones semicentrífugas y de presión, la alimentación de la presión es el criterio principal. La velocidad rotatoria también ejerce una influencia sobre la estructura. El efecto más común del incremento de la velocidad es promover el

afinamiento del grano, aunque esto pueda elevar la turbulencia inducida por la inestabilidad de la masa líquida a bajas velocidades.

5.4.2 Temperatura de colada. La temperatura ejerce una influencia principal sobre el modo de solidificación y tiene que ser determinada, en parte, en relación con el tipo de estructura requerida. Las bajas temperaturas se asocian al refinamiento máximo del grano y con estructuras equiaxiales, mientras que temperaturas más altas, promueven crecimiento columnar en muchas aleaciones. Sin embargo, consideraciones prácticas limitan la gama disponible de temperatura de vertido, la temperatura debe ser suficientemente alta para asegurar un flujo metálico satisfactorio y libre de turbulencias, evitando estructuras con granos gruesos y el riesgo de desgarre debido al calentamiento excesivo.

5.4.3 Velocidad de colada. Está gobernada sobre todo por la necesidad de acabar el llenado antes de que el metal se solidifique, aunque, si es demasiado alta puede causar turbulencia y expulsión del metal. Una velocidad de colada lenta, ofrece como ventaja permitir una solidificación direccional y una alimentación mas adecuada.

5.4.4 Temperatura del molde. La temperatura del molde es sólo de importancia secundaria en relación con la estructura. Su importancia principal está en su valor y el tiempo utilizado en el precalentamiento. La extensión de dicho tiempo disminuye el riesgo del agrietamiento de la pieza en la fundición centrífuga real.

haya menos sensibilidad al encogimiento interno, porosidad de gas e inclusiones no metálicas. Tales defectos pueden estar en las superficies externas o internas, dando una probabilidad fuerte de detección sin el recurso de la radiografía o pruebas ultrasónicas. Los defectos más comunes son segregaciones, frecuencia del fenómeno de “banding”, eutéctico fosforoso binario, lluvia de metal, y la variación en el espesor de la pieza. Adicional a estos se encuentran las formas del grafito debido a las inclusiones, burbujas de aire, vibración y grumos de metal.

En general, los tubos hechos en fundición centrífuga tienen menos defectos de fabricación que los tubos hechos en colada estática de moldes en arena. Sin embargo, los problemas que ellos realmente tienen son variados y pueden ser perjudiciales para el funcionamiento del tubo.

5.6.1 Segregación y “banding”. En las fundiciones centrífugas hay varias formas de segregación. La de mayor gravedad es la segregación llamada “banding”. Esto ocurre raras veces en fundiciones de pared delgada. A pesar de la impresión general, el “banding” ocurre tanto en la fundición centrífuga horizontal como en vertical.

El “banding” son zonas anulares de segregado, componentes de bajo punto de fusión, como fases eutécticas y óxido o inclusiones de sulfuros. Las banding son caracterizadas por líneas demarcadas en el borde exterior, que por lo general se combina con el metal base en la fundición.

La mayor parte de aleaciones son susceptibles al “banding”, pero entre mayor sea el rango de solidificación más pronunciado puede ser el efecto. Este defecto se ha asociado cuando se usa el nivel crítico de la velocidad de rotación y al uso de velocidades muy bajas que producirían el levantamiento esporádico del metal fundido. Ambos mecanismos pueden estar implicados. Normalmente mientras

menores ajustes se hagan a las variables de operación de la fundición como: la velocidad de rotación, la rata de vertido, el metal y la temperatura del molde, menores presencia del defecto de segregación o “banding”.

Varias teorías han sido presentadas para explicar la presencia de las líneas de segregación o “banding”. Una teoría es aquella en la cual la vibración es la causa principal. La teoría más lejos declara que el crecimiento de estos nuevos núcleos sustituye en tal manera para formar una especie de sandwich de metal líquido rodeado por el metal sólido, que es aislado del baño líquido que lleva.

Otra teoría propone que el banding pueda ser causado por la variación en la fuerza gravitacional entre la cima del molde y el interior, por la separación centrífuga de los componentes metálicos durante la solidificación. Esta teoría asume que la solidificación ocurre en cuestión de segundos incluso en secciones gruesas. Esto, desde luego, no es así, porque la solidificación de secciones gruesas ocurre en varios minutos.

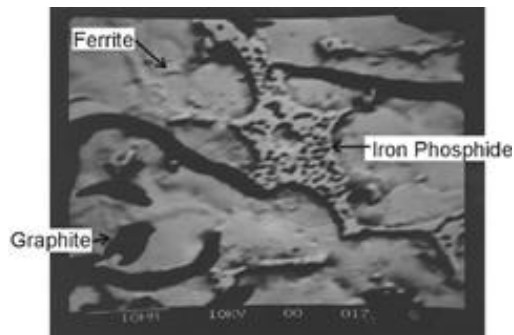
Otra explicación del “banding” afirma que el proceso es mucho menos complicado; y se explica por la existencia de irregularidades en el flujo del metal líquido cuando entra en el molde en rotación. El metal al enfriar en el molde, forma una fundición tubular que tiende a solidificarse en la manera normal. Sin embargo, si el metal líquido adicional llega a la posición particular muy tarde, el metal líquido inicial ya se ha solidificado parcialmente, entonces causaría una discontinuidad conocida como “banding”.

Examinando de cerca el comportamiento del metal cuando entra en un molde en rotación, se ha observado que el metal generalmente no fluye continuamente, sino que tiende a levantarse longitudinalmente. Allí, por lo general, hay una acumulación de metal fundido como resultado de la formación inicial de la primera fundición, cubierto más tarde por el metal adicional. Se ha observado que, usando el mismo equipo, el mismo molde, y la misma máquina, pero cambiando las

condiciones de vertido, la fundición puede ser producida sin segregación o “banding”.

5.6.2 Eutético fosforoso binario. El fósforo es un elemento normal en las fundiciones industriales. La adición de fósforo a las fundiciones se hace para mejorar la colabilidad. Sin embargo, el hierro y el fósforo tienen una gran afinidad química que se traduce en la formación del fosfuro de hierro, compuesto duro y con alta expansión térmica. El fosfuro de hierro vuelve dura a la fundición. A determinadas concentraciones de fósforo, el fosfuro de hierro y el hierro forman un eutético llamado eutético fosforoso binario que segrega en los límites de grano, disminuyendo las características mecánicas de las fundiciones. La figura 10 muestra la presencia del eutético fosforoso binario.

Figura 10. Eutético fosforoso binario



5.6.3 Lluvia de metal. En una máquina horizontal, si el molde se hace girar a una velocidad demasiado baja o el metal se vierte en el molde demasiado rápido, ocurre el defecto conocido como “raining” o lluvia de metal. Es decir, el metal fundido en realidad se cae de la parte superior del molde a la parte inferior. Este

fenómeno puede ser visto examinando en el extremo del molde rotativo al finalizar la colada.

“Raining” o la lluvia de metal ocurre porque el metal fundido no alcanza a rotar a la velocidad del molde. Si la fricción del metal fundido contra la pared del molde es baja, debido a una velocidad demasiado lenta, el metal fundido no alcanzará una alta velocidad rotatoria que venza la fuerza de gravedad y caerá de la parte superior del molde.

Una causa podría ser la temperatura inadecuada. Si el metal fundido tiene alta temperatura a la entrada del molde, su fluidez será alta y su viscosidad será baja. Será difícil para el metal fundido acelerar rápidamente la velocidad de rotación necesaria para vencer la fuerza de gravedad. Esto puede ser remediado por una velocidad de rotación más alta, o más fácil, reduciendo la velocidad de vertido.

5.6.4 Variación en el espesor de pared. La variación del espesor de la pared es causada por cambios de la velocidad de flujo de metal de la cuchara en el molde. Esto puede ser un problema si la pared de tubo disminuye considerablemente que lo permitido por las normas usadas en el diseño del tubo.

5.6.5 Forma del grafito debido a las inclusiones. A diferencia de los tubos convencionales, donde las inclusiones tienden a ser producidas por elementos añadidos al metal fundido, las inclusiones identificadas en el tubo de fundición centrífuga aparecen debido al derrame del metal fuera de la cuchara antes o después de verter el metal dentro del molde. La rotación del molde tiende a alargar las gotas metálicas prematuras alrededor de la circunferencia del tubo, dándoles la apariencia de lágrimas. El tamaño de las inclusiones puede variar considerablemente de unos milímetros de espesor o tan grueso como el mismo

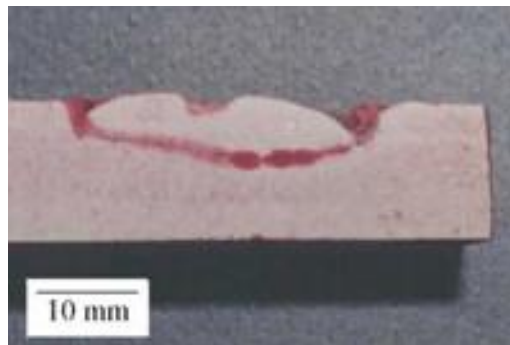
tubo. La figura 11 muestra una inclusión relativamente pequeña localizada en la superficie del tubo, donde parcialmente se ha separado de la superficie de este. La inclusión muestra una capa de óxido de hierro sobre la superficie de la inclusión y un área porosa localizada inmediatamente debajo de ella.

Figura 11. Vista superficial de la inclusión



La figura 12 muestra la misma inclusión, pero en secciones sobre muestras diferentes. La muestra de la figura 12 fue tratada con tintas para destacar el límite de inclusión. Esta inclusión actuaría como un agujero en el tubo, disminuyendo su resistencia.

Figura 12. Inclusión revelada por la prueba de tintas



5.6.6 Burbujas de aire. Normalmente no se esperaría encontrar poros originados por el aire o gases en tubos de fundición centrifuga. El aire tiene una distancia muy corta para viajar y escaparse del tubo metálico, ya que este sólo debe viajar por el espesor del tubo antes de que el metal solidifique, no en su longitud. Sin embargo, como se muestra en la figura 13, el aire a veces también es atrapado en las paredes de este tipo de tubo. Las causas no son claras, pero pueden estar relacionadas con la temperatura del metal fundido que puede ser baja. De modo que este se solidificara más rápidamente que los tubos.

Figura 13. a) y b) Burbujas de aire



a)



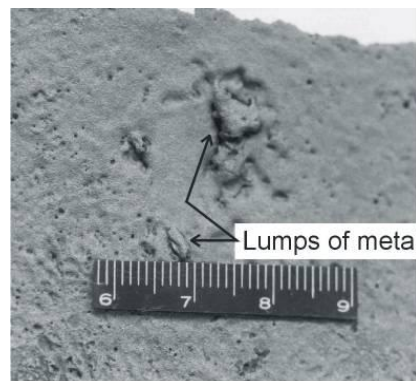
b)

Los moldes de los tubos normalmente son limpiados y secados entre cada fundición. Sin embargo, si no se seca adecuadamente el molde, esta un modelo característico sobre la superficie externa de la pared del tubo, de poros finos alineado en la dirección circunferencial. En este caso el agua es distribuida alrededor de la pared de tubo por el molde. Cuando este se pone en contacto con el metal fundido el agua se evapora y si el vapor de agua no alcanza a salir forma agujeros en la superficie de tubo cuando el metal se solidifica.

5.6.7 Vibración. La vibración de la máquina, el establecimiento de frecuencias resonantes, y el equilibrio dinámico impropio son las condiciones que producen dos tipos de fundiciones de mala calidad. Un tipo demuestra un agujero central en el molde en la parte mas baja de la fundición. Esta diferencia en el tamaño de agujero es acompañada por manchas oscuras segregadas en el centro del tubo, que contienen las segregaciones de carbón, azufre, fósforo, e inclusiones no metálicas. Severas vibraciones de la máquina también producen fundiciones sujetas al carbón circunferencial, el fósforo, y aros de segregación de azufre durante la solidificación; los aros se hacen más frecuentes y pronunciados con los aumentos de la vibración.

5.6.8 Grumos. Los tubos también pueden tener grumos de metal que soporta la superficie de tubo. El metal normalmente fundido sería extendido fuera por el proceso de repujado. La presencia de los grumos sugiere que el tubo de metal fuera refrigerado deseablemente durante el proceso de fundición, permitiendo a los grumos solidificarse en el lugar.

Figura 14. Grumos en el metal



5.7 INOCULACION

El propósito de la inoculación es aumentar la calidad metalúrgica del hierro gris por el mejoramiento de las siguientes características:

1. Mejoramiento de las propiedades mecánicas constantes y estables.
2. Alta maquinabilidad.
3. Menor sensibilidad al espesor de la pieza
4. Carburos libres
5. Obtención de una estructura perlítica.
6. Aumento de las células eutécticas
7. Obtención del grafito tipo A.

La inoculación consiste en añadir al metal fundido en el momento de colar, bien sea en la piquera o en la cuchara. Es necesario tener cuidado a la hora de poner el inoculante en cucharones calientes y en el vertido porque el material puede sinterizarse o oxidarse, convirtiéndose en inerte la actividad del inoculante.

Hay varias clases de inoculantes pero el método de operación es muy parecido.

5.7.1. Tipos de inoculantes. Hay tres tipos de inoculantes: base grafito, aleaciones de ferrosilicio, calcio silicio y aleaciones más complejas.

5.7.1.1 Inoculante base grafito. El carbono se disuelve rápidamente en el hierro líquido. Esta disolución depende de la temperatura (la más alta), la composición química (bajo carbono y silicio) y al movimiento del metal líquido en el horno. A mayor movimiento más carbono se disolverá. Esto produce una cantidad baja de óxidos pero es difícil de reproducir o controlar. Puede ser beneficioso para el metal

si es añadido muy cerca al llenado de los moldes, a una temperatura baja y combinación con ferrosilicio.

5.7.1.2 Aleaciones de Ferrosilicio. El silicio puro es un inoculante débil, es necesario usar ferrosilicio. El material tiene también algo de manganeso, que realmente inicia la segregación de grafito y puede reaccionar con el azufre. El Ferrosilicio es un iniciador bueno para óxidos de silicio si la calidad metalúrgica del metal en el horno es correcta. El mejor inoculante es el ferrosilicio con algunos elementos catalizadores, que forman óxidos heterogéneos. Los elementos son: Al-, Zr, Ba, Bi, Sr, Ce y otros. Algunos de ellos son usados, en caso del hierro gris para formar sulfuros y estabilizar la estructura perlítica.

El inoculante más común contiene entre el 65 y el 85 % de silicio, algo de aluminio (1,0 al 1,6 % Al-) y el calcio (0,4 - 0,6 %). A temperatura alta requieren, Al y Ca. Pero el alto contenido de Al debe ser controlado para evitar poros.

5.7.1.3 Calcio. Silicio. Esto es un inoculante muy bueno y sobre todo es usado para hierro gris. El calcio como elemento es prácticamente insoluble en el hierro líquido. Este formará CaO , $\text{Ca}_x\text{S}_y\text{O}_z$ y elementos, que perfectamente pueden actuar como nucleantes y iniciadores para la formación de óxidos de silicio. El efecto comienza en una cantidad de Ca del 0,002 % en el metal líquido. El efecto es constante sobre este punto, independientemente de la cantidad de calcio.

El problema es que esto forma la escoria muy líquida, que es difícil de capturar y quitar. Por lo tanto este nunca deberá ser usado en el vertido o para el tratamiento de desmoldeo.

5.7.2 Tamaño de grano del inoculante. El tamaño de grano del inoculante usado en la cuchara debe tener una granulometría comprendida entre 10 y 30 mm para cucharas con capacidad de más de 1 tonelada y de 1 a 4 mm para cucharas menores a 500 kg. En cambio el tamaño de grano del inoculante usado en la piqueta, se prefiere un tamaño entre 0,2 y 0,7 mm para pequeñas fundiciones, y entre 1 a 3 mm para verter con un contenido superior a 250 kg.

5.7.3 Selección del inoculante. Como regla general para su selección se tiene en cuenta que cuanto mas bajo sea el carbono equivalente, se requiere mayor inoculación para obtener buenos resultados. En una fundición gris los inoculantes mas recomendados son:

5.7.3.1 FeSiCa. La cantidad de calcio será el 0.5% ya que en porcentajes mas altos resulta menos eficaz. Este inoculante es común en adiciones de 0.1 – 0.3%.

5.7.3.2. FeSiCaBa. Si el efecto del inoculante FeSiCa es demasiado bajo, la aleación FeSiCaBa tendrá 50 % más alto el efecto. La cantidad puede ser el 30 % menos para la misma efectividad comparado con FeSiCa.

5.7.3.3. FeSiSr o FeSiCaCe. Estos tipos de inoculantes son muy eficaces para fundiciones de pared delgadas y hierros de alta resistencia. La cantidad puede ser el 50 % menos comparada con FeSiCa. Para FeSiSr, el contenido debe ser inferior al 0,10 % y no debe existir ningún tipo de contaminación con calcio.

5.7.4 Tipo de adición del inoculante. Los tipos más comunes de adición son:

5.7.4.1. Inoculación en la cuchara. Sobre todo es usado para fundiciones con pequeños espesores que se solidificarán rápidamente. La cantidad estará entre el 0,1% y 0,6 %, según la fundición tratada. La inoculación en la cuchara es el método más simple y más flexible de inocular el hierro. Para asegurar la disolución apropiada de inoculante debe ser añadido a la corriente metálica una vez que la cuchara tiene un 25 % de llenado. El inoculante no debería ser añadido en un cucharón vacío debido al riesgo de ser encapsulado en la escoria líquida.

Hay tres métodos principales de adición del inoculante al cucharón: por gravedad que se alimenta en la corriente; en segundo lugar por inyección ayudada por aire de partículas finas en la corriente y finalmente por la técnica del cable de inoculación.

5.7.4.2 Inoculación en la piquera. Es usado para fundiciones de medio y gran peso. La cantidad estará entre 0,1% y el 0,3 % para fundición gris y 0,3% al 0,5 % para fundición dúctil, según el porcentaje de silicio en la fundición.

5.7.4 Cantidad de adición. En general, las cantidades serán de 0,1% y el 0,3 % en las fundiciones grises. La cantidad de adición está influenciada por la cantidad del carbono equivalente ya que si hay un incremento en este, se necesita una menor cantidad de inoculante. A menor espesor de pared necesitará una solubilidad más rápida del inoculante. La cantidad de inoculante también está influenciada por el tipo de horno usado: si es un horno eléctrico necesitará 2 veces la cantidad que es necesaria si se usa un horno cubilote. Además es necesario conocer el estado de la materia prima ya que si presenta oxidación, es necesario más cantidad de inoculante.

6. PROCESO DE FABRICACIÓN DE LAS CAMISAS CENTRIFUGADAS

El procedimiento usado en la planta para obtener una camisa centrifugada a nivel industrial parte de la selección y preparación de la materia prima para elaborar la carga que permite desarrollar las demás etapas del proceso:

6.1 MATERIA PRIMA

6.1.1 Carga metálica. El material usado para la fabricación de las camisas centrifugadas en cuanto a carga metálica es chatarra comprada en plaza, compuesta esencialmente por culatas, bloques y campanas. Estos componentes son bajos en fósforo ($< 0.25\%$) aunque se prefiere que su contenido sea inferior a 0.15% . El contenido de silicio es aproximadamente entre 2% y 2.25% y el carbono entre 3.2% y 3.4% . El peso individual por pieza no puede superar los 500 kilos por la dificultad que representa para su partida y manejo dentro del patio de descargue. El peso de la carga es aproximadamente de 100 – 115 Kg, distribuida de la siguiente manera:

Materia Prima	Cantidad
Chatarra	103,5 Kg.
Retornos	11,5 Kg.
ferroaleaciones	450 – 550 gr.

Tabla 1. Composición química aproximada de algún tipo de chatarra de hierro colado y acero

TIPO DE CHATARRA ELEMENTO	% DE COMPOSICIÓN DE CADA ELEMENTO								
	Si	C	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	
Maquinaria textil	2,40	3,40	0,75	0,20	0,12	-	-	-	-
Fundición de automóviles	2,25	3,30	0,75	0,15	0,12	0,25	0,10	Tr	0,15
Chatarra agrícola	2,25	3,40	0,60	0,30	0,12	Tr	Tr	-	-
Chatarra de ferrocarril	1,90	3,20	0,60	0,35	0,10	-	-	-	-
Radiadores de calefacción	2,30	3,45	0,55	0,55	0,10	-	-	-	-
Zapatas de frenos	1,15	3,10	0,40	0,50	0,20	-	-	-	-
Ruedas de vagón de ferrocarril	0,55	3,50	0,55	0,30	0,13	-	-	-	-
Chatarra de maleable agrícola y automóviles	0,95	2,30	0,40	0,15	0,10	-	-	-	-
Rieles de ferrocarril	0,25	0,60	0,80	0,05	0,05	-	-	-	-
Chatarra de acero de automóviles	0,10	0,30	0,70	0,03	0,03	0,15	0,20	Tr	Tr
Chatarra de acero estructural	0,05	0,12	0,20	0,03	-	0	-	0,10	0,10

6.1.2 Ferroaleaciones. Las ferroaleaciones son otros de los componentes que forman parte de la carga, son usadas como desoxidantes y como aportadores de elementos de aleación, la más utilizada es el ferrosilicio y en algunas ocasiones se usan el ferromanganeso ferrocromo, ferróniquel y ferromolibdeno.

La siguiente tabla muestra la composición química y algunas características físicas de las ferroaleaciones usadas en el proceso de obtención de las camisas centrifugadas en LAVCO.

Tabla 2. Ferroaleaciones

FERROALEACIONES	COLOR	PRESENTACION	COMPOSICION QUIMICA								
			Mn%	Si%	Cr%	Ni%	C%	S%	P%	Co%	Cu%
Ferromanganeso	Gris metálico	Piedras/polvo	75.87	0.11	-	-	6.75	0.0006	0.228	-	-
Ferrosilicio	Gris metálico	Polvo fino	-	75.67	-	-	0.097	0.001	0.019	-	-
Ferróniquel	Metálico	A granel	-	0.38	0.03	32.49	0.030	0.010	0.02	0.730	0.06
Ferrocromo	Gris metálico	Piedras	-	2.39	67.85	-	7.88	0.026	0.028	-	-

6.1.3 Inoculantes. Los inoculantes usados son el ferrosilicio y el IM-22.

6.1.3.1 Inoculante IM 22. Este inoculante es un fuerte grafitizante por contener grandes elementos promotores del grafito como: zirconio, calcio y bario, además del silicio, que en presencia del azufre tiene una fuerte acción inoculante, afinando así la textura por proporcionar un mayor número de células eutécticas.

El calcio se formador de gérmenes de cristalización del grafito. Lo anterior es válido también para el bario, el cual tiene un efecto adicional de retardo al descomponerse. El bario sumado al calcio, amplía el rango de temperatura en el cual actúa este inoculante.

Este inoculante es producido en hornos de arco inmerso en una de las plantas más modernas del mundo donde gracias a la utilización del carbón vegetal y mineral de hierro como materias primas, los niveles residuales de elementos indeseables son extremadamente bajos.

6.1.3.2. Inoculante ferrosilicio. Consiste en una aleación de hierro y silicio con cierto contenido en impurezas (calcio, aluminio, etc.). El ferrosilicio como inoculante tiene características desoxidantes, es esencial para minimizar la presencia de carburos eutécticos y facilitan la producción del grafito controlando su tamaño y distribución. Consigue mejores propiedades mecánicas sin aumentar la fragilidad. Se adicionan aproximadamente 7 cucharadas de 100 gr.

Tabla 3. Inoculantes

INOCULANTE	TAMAÑO	COLOR	PRESENTACION	COMPOSICIÓN QUIMICA									APLICACIÓN	
				Mn%	Si%	Ca%	Ba%	Zr%	Al%	C%	S%	P%		
IM-22	3/8" X8M	Negro	Granulado	5.0-7.0	60-65	0.6-0.9	0.6-0.9	5.0-7.0	0.75-1.25					Chorro.
Ferrosilicio	0.3 mms	Gris metálico	Polvo fino		75.67				1.18	0.097	0.001	0.019	Directamente en la cuchara del metal líquido.	

6.1.4 Carga no metálica. El coque es el elemento principal en la carga no metálica, el cual interviene en el grado de grafitización, el efecto de los carburos, la estructura del grafito y afecta la formación de la matriz. El coque proviene de Zipaquira. A su vez forman parte de esta carga algunos minerales usados como fundentes tales como la caliza y la fluorita utilizada para aumentar la fluidez de la escoria.

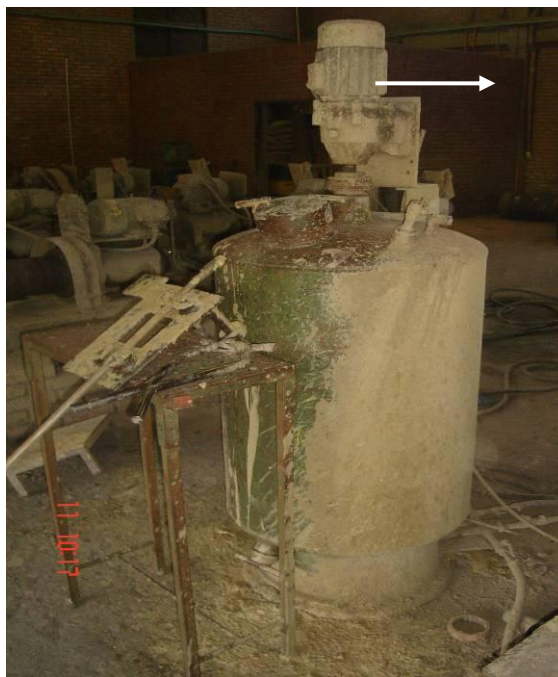
6.1.5 Unto refractario. El recubrimiento refractario es una parte integral en la fabricación y promueven un amplio rango de beneficios como son: el mejoramiento del acabado superficial de la pieza ya que las partículas refractarias se depositan entre y sobre la superficie del molde, creando una superficie tersa para el contacto con el metal, con el objetivo de reducir microporosidades por contracción o microrechupes, eliminar erosión, proteger a los moldes permanentes y facilitar el desmoldeo.

Estos untos o pinturas refractarias contienen una variedad de ingredientes combinados los cuales aportan características deseadas a la fundición. En este caso específico el unto contiene como agente refractario la arena sílica (SiO_2), el agua es usada como solvente, adicional a estos contiene aglutinantes para mejoran la adhesión de las partículas refractarias entre si y mejorar la adhesión

del recubrimiento a la superficie del metal como la dextrina $((C_6H_{10}O_5)_n \cdot H_2O)$ formada de la hidrólisis de un almidón a glucosa y la bentonita una arcilla compuesta esencialmente de montmorillonita. Con el fin de promover la humectación del refractario con el solvente e impedir la separación de partículas refractarias fuera del solvente, se adiciona el arylon que combina tensoactivos aniónicos y no aniónicos con propiedades humectantes y dispersantes.

La aplicación del unto se realiza con un roceado de pistola, en el cual se encuentra la mezcla anteriormente mencionada como una pasta mostrado en la figura 15 y se aplican dos capas de refractario a cada pieza fundida. La desventaja es la dificultad para pintar eficientemente los huecos profundos, mantenimiento del equipo y emisiones que significan desperdicios.

Figura 15. Tanque mezclador de pintura y pistola de roceado



6.2 SELECCIÓN DE LA CARGA

La selección de la chatarra o carga metálica depende de tres factores la homogenización de la composición química, la naturaleza y su origen, estos deben tenerse en cuenta a la hora de buscar la mejor calidad del producto. A su vez hay otros componentes de la carga que tienen mucha influencia como son la carga no metálica y la caliza que actúan como fundente. El coque empleado en producir la cama del horno debe ser de la mayor calidad posible y el tamaño de los trozos, debe oscilar entre 1/10 y 1/12 del diámetro interior del horno.

El coque que se emplea en el cubilote y particularmente en la cama, debe poseer buena resistencia mecánica, ya que tiene que soportar el peso de las cargas metálicas que se introducen por la puerta de carga. Un valor adecuado de resistencia mecánica se considera el siguiente 15 MPa. El término resistencia mecánica aquí también puede entenderse como la mayor o menor tendencia al fraccionamiento de los trozos de coque.

6.3 PREPARACIÓN DE LA CARGA

Una vez seleccionada y preparada la chatarra en varios tamaños con el fin de facilitar su manejo, se escogen las ferroaleaciones convenientes para el proceso; en este caso el ferrosilicio y el inoculante el cual va ser aplicado directamente al chorro. De igual manera se tiene preparada la carga de coque seguido del fundente es decir piedra caliza y fluorita. Por ultimo es importante regular el soplo con la cantidad de coque quemado por hora. La preparación de la carga se realiza un día antes del día de fundición y la introducción de la carga se realiza manualmente.

6.4 FUSIÓN

La fusión se lleva a cabo en un cubilote de revestimiento ácido con una sola hilera de toberas, con una longitud de más de 3 metros y con un diámetro interno de 60 cm, fabricado por industrias LAVCO mostrado en la figura 16. El método de colada es intermitente. Se carga por la parte superior con camas de chatarra de hierro, coque y piedra caliza. Para la combustión del coque se inyecta aire con unos ventiladores de alta presión, este accede al interior por unas toberas ubicadas en la parte inferior del horno.

Por cada kilogramo de coque que se consume en el horno, se procesan 10 veces los kilogramos de hierro y por cada tonelada de hierro fundido se requieren 1/3 Kg de la carga de coque en cuanto a la piedra caliza, dependiendo su calidad.

Figura 16. Horno cubilote



6.5 MOLDEO

El metal fundido sale una vez ha sido picado el horno y se adiciona el inoculante directamente al chorro mientras se llena el caldero a una temperatura de calada de 1243°C, con el caldero a tope se pone el tapón refractario para impedir que continúe saliendo metal. El caldero es transportado por el puente grúa hasta el lugar donde se encuentra la coquilla que ya se encuentra instalada en la maquina centrifuga y se ha precalentado por un tiempo y temperatura determinado con el fin de evitar el fuerte choque térmico. Se dispone a realizar el vaciado donde se debe verificar que la maquina centrifuga este en funcionamiento y se llena tratando de evitar al máximo que se desperdicie metal.

6.5.1 Máquina Centrifuga. Este equipo es diseñado y fabricado por industrias LAVCO para el centrifugado de tubos en fundición gris y para camisas de la línea industrial. El equipo tiene un mecanismo electromecánico mediante el cual un motor alimentado eléctricamente genera un movimiento de rotación, que es transmitido a través de un eje a un troquel cilíndrico en el cual se moldea la aleación obtenida en el cubilote como el mostrado en la figura 17. Esta conformado por chumaceras en las cuales se encuentran montadas las ruedas que soportan la coquilla, esta rueda es al mismo tiempo conducida en el sistema de transmisión por correas al cual le genera potencia un motor eléctrico a una velocidad de 1760 rpm y una potencia de 10 HP, las demás ruedas sirven de soporte y su movimiento es inducido por la coquilla la cual gira en sentido horario.

Los ejes no deben ser alineados paralelamente, se deben dejar ligeramente cerrados en la parte delantera para mantener la coquilla haciendo presión contra las ruedas.

Figura 17. Maquina centrifuga previa al llenado



Se limpia la coquilla con presión de aire y se pone a girar a una velocidad determinada, se aplica doble capa de refractario a una temperatura alrededor de 250°C para evitar que el metal se pegue a las paredes de la coquilla y produzca defectos característicos en las piezas, se disminuye la velocidad centrifuga hasta cero y con la ayuda del puente grúa y del operario se coloca la tapa a la coquilla. Una vez verificado que la tapa esta puesta correctamente se procede a poner un dispositivo adicional para el llenado.

6.5.2 Colada y llenado. El metal fundido es vertido al molde empleando un bebedero o tetera previamente dispuesto en la entrada del molde. El tiempo de llenado por pieza es 49 segundos. La temperatura de colado promedio es 1241 °C y el tiempo total de centrifugación es aproximadamente 10.01 minutos. La coquilla excede algunos mm de las dimensiones requeridas por la pieza las cuales son ajustadas por mecanizado.

Figura 18. Inicio de llenado



Figura 19. Llenado a 10 seg



Figura 20. Llenado a 18 seg



Figura 21. Llenado total a 49 seg



6.5.3 Solidificación y enfriamiento. Después de la colada, se debe esperar que la pieza se solidifique y se enfríe en el molde. Este proceso de solidificación y enfriamiento preliminar comienza a una temperatura promedio de 900°C . El inicio de la solidificación es apreciable por los cambios de tonalidades alrededor de la camisa y por la formación de aros, una vez solidificada se extrae a una temperatura de 956°C , para esto hay que retirar la tapa de la coquilla. El enfriamiento final se da por fuera del molde y tarda aproximadamente 6 horas.

Figura 22. Inicio de solidificación



Figura 23. Solidificación a 6 min



Figura 24. Solidificación a 8 min



Figura 25. Solidificación a 10 min



6.5.4 Extracción. Luego de haber solidificado, la pieza se extrae de la coquilla a una temperatura promedio de 884°C. La pieza es llevada a una cama de arena para realizar un proceso de mecanizado hasta lograr las dimensiones requeridas.

Figura 26. Inicio de extracción



Figura 27. Extracción a 40 seg



Figura 28. Extracción a 33 seg



Figura 29. Extracción a 1 min



7. DESARROLLO EXPERIMENTAL

7.1 DETALLES ESTADÍSTICOS DE LA PRESENCIA DE LOS DEFECTOS

En primer lugar se realizó un detalle estadístico de la presencia de los defectos como se ilustra en la tabla 4 donde se indican: las condiciones de operación de colada y moldeo, el numero de camisas fabricadas seleccionadas para establecer la cantidad de piezas defectuosas, donde se colaron 57 camisas de diferentes referencias dando como resultado 7 camisas defectuosas, de las cuales se tomó las mas significativa para realizar el análisis. La tabla 5 indica con más detalle cada referencia en la cual se encontraron dichos defectos para visualizar con más claridad las condiciones de operación en los que estos se presentaron.

Tabla 4. Condiciones de operación de las camisas fabricadas

PIEZAS FABRICADAS		T° prom	T° prom	T°prom	T° prom	TIEMPO prom	PIEZAS
REF.	CANTIDAD	COQUILLA	COQUILLA/PINTURA	COLADO	EXTRACCIÓN	CENTRIF(min)	DEFECTUOSAS
7056	5	305°C	265°C	1236°C	919°C	11	
7057	5	305°C	265°C	1238°C	900°C	11.25	
7058	5	308°C	266°C	1241°C	909°C	10.0	
7059	5	306°C	265°C	1243°C	932°C	9	
7060	5	306°C	270°C	1240°C	883°C	11	
7061	2	298°C	260°C	1241°C	906°C	9	
7062	5	306°C	265°C	1243°C	918°C	9.5	1
7063	5	311°C	270°C	1241°C	941°C	10.04	1
7064	5	304°C	263°C	1240°C	766°C	10.16	
7065	5	308°C	268°C	1242°C	906°C	10.0	2
7066	5	307°C	266°C	1240°C	921°C	10.14	2
7067	5	303°C	261°C	1239°C	934°C	10.0	

7068	5	301°C	260°C	1238°C	939°C	10.0	1
7069	5	304°C	261°C	1240°C	910°C	10.08	
TOTAL	67						7

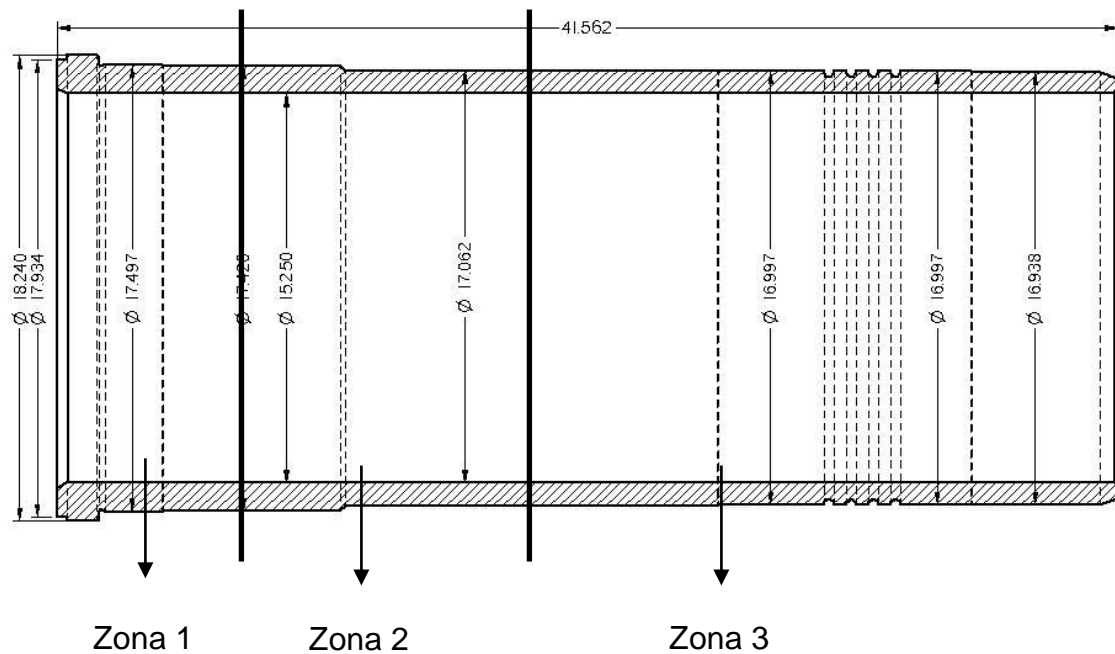
Tabla 5. Condiciones de operación de las camisas defectuosas

PIEZAS DEFECTUOSAS		T°				TIEMPO
REF.	CANTIDAD	COQUILLA	T° COQUILLA/PINTURA	T° COLADO	T° EXTRACCIÓN	CENTRIF(min)
7062-4	1	307°C	265°C	1241°C	917°C	9
7063-5	1	330°C	281°C	1244°C	910°C	11
7065-2	1	303°C	261°C	1247°C	890°C	11.2
7065-4	1	311°C	274°C	1243°C	918°C	9.3
7066-2	1	313°C	272°C	1239°C	905°C	11
7066-4	1	310°C	269°C	1239°C	907°C	10.2
7068-4	1	297°C	258°C	1237°C	947°C	10.30
PROMEDIO		310°C	269°C	1241°C	913°C	10.33

Después de escoger la pieza más significativa para realizar los ensayos, se procedió a realizar un análisis más detallado conociendo de antemano que el proceso de llenado de las camisas centrifugadas se considera como la etapa más crítica pues de este depende la obtención de una pieza con un excelente acabado. La defectología encontrada durante la fabricación de las camisas en la superficie son defectos típicos producidos en la técnica de fundición como son las manchas y los poros.

Con el objeto de determinar en que zona se hace más frecuente la aparición de dichos defectos, se tomó la pieza más significativa y se le realizaron cortes dividiendo la pieza en varias zonas como se muestra en la figura 30. Cada zona sufrió desbastes consecutivos cada 1 mm de profundidad, para verificar en cual de ellas se hace más evidente su presencia y estimar la extensión de los defectos.

Figura 30. Corte longitudinal de la camisa centrifugada



Las figuras que se indican a continuación muestran el mecanizado realizado a las diferentes zonas en las que se dividió la camisa. Esta operación busca encontrar la distribución de los defectos en la pieza.

Zona 1:

Figura 31. Pestaña sin mecanizar



Figura 32. Mecanizado a 6 mm

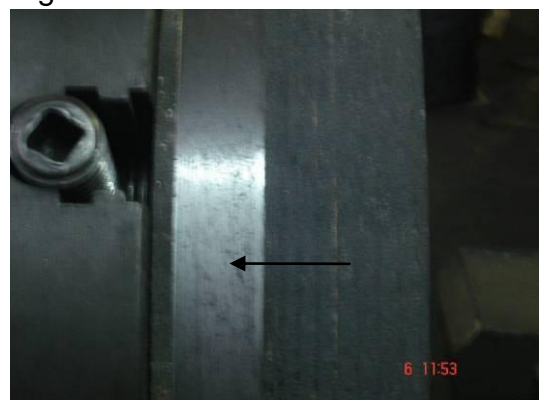


Figura 33. Mecanizado a 7 mm

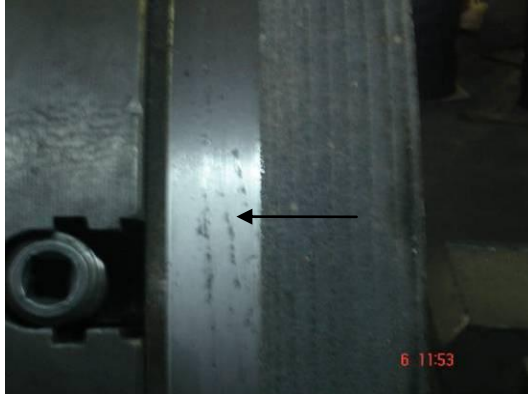


Figura 34. Mecanizado a 7 mm

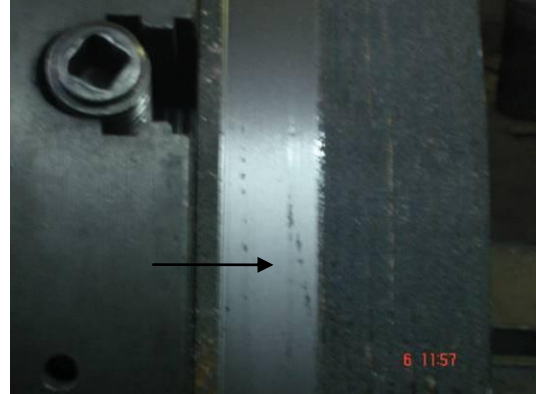


Figura 35. Mecanizado a 8 mm

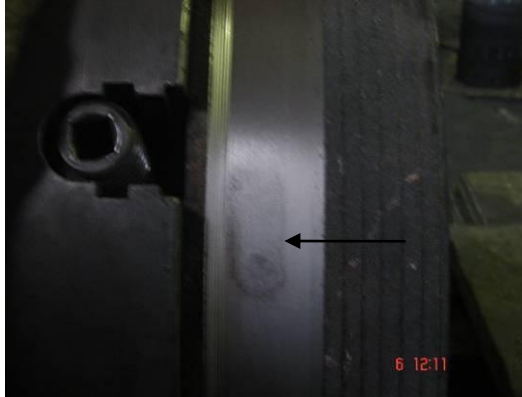


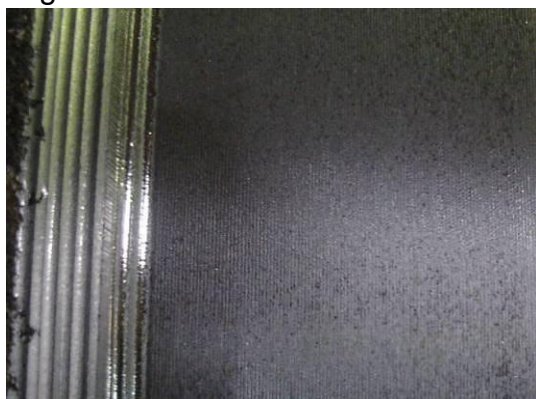
Figura 36. Mecanizado a 10 mm



Figura 37. Mecanizado a 11 mm



Figura 38. Mecanizado a 13 mm



Zona 2:

Figura 39. Sin mecanizado

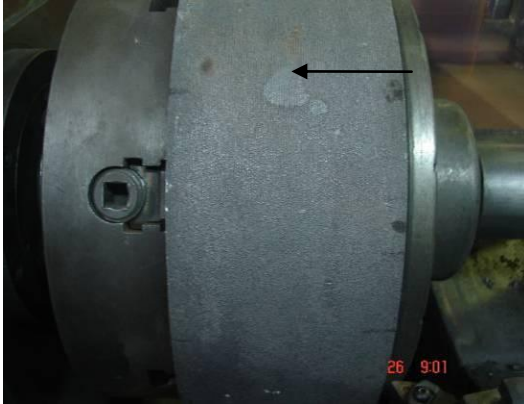


Figura 40. Mecanizado a 2 mm

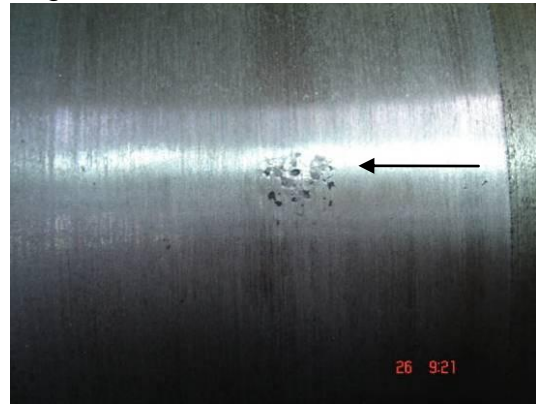


Figura 41. Mecanizado a 4 mm

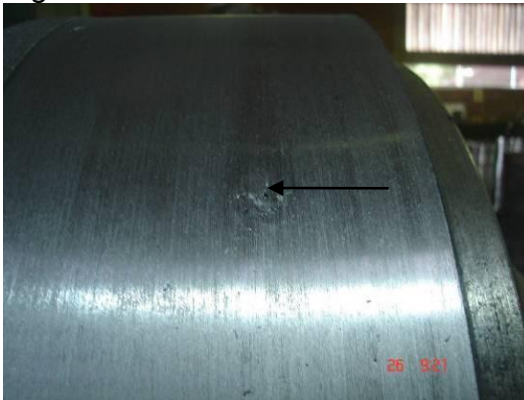


Figura 42. Mecanizado a 6 mm

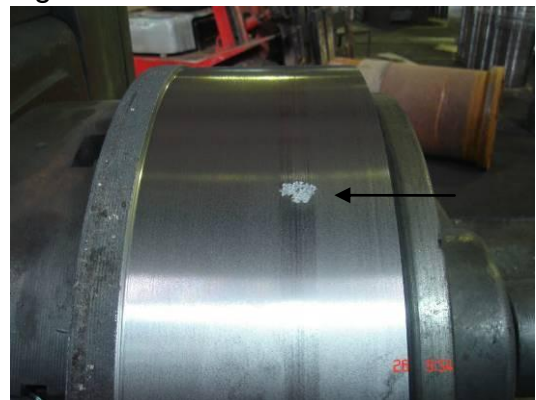


Figura 43. Mecanizado a 10 mm



Figura 44. Mecanizado a 10 mm

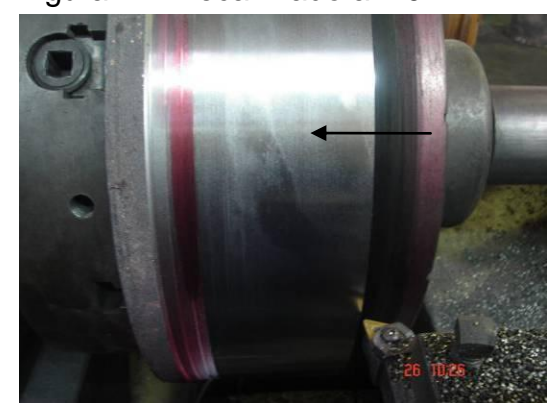


Figura 45. Mecanizado a 11 mm

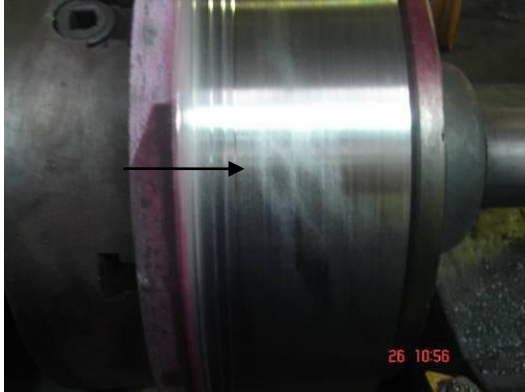


Figura 46. Mecanizado a 13 mm



Zona 3:

Figura 47. Zona sin mecanizar

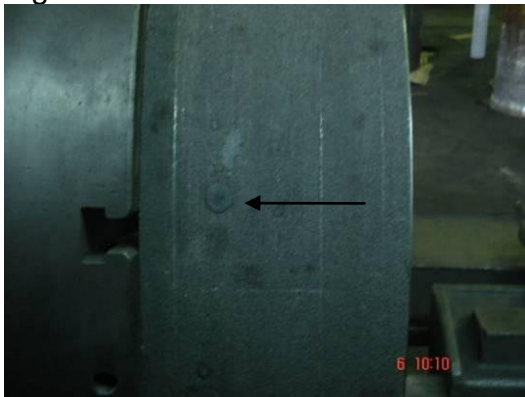


Figura 48. Mecanizado a 1 mm



Figura 49. Mecanizado a 2 mm

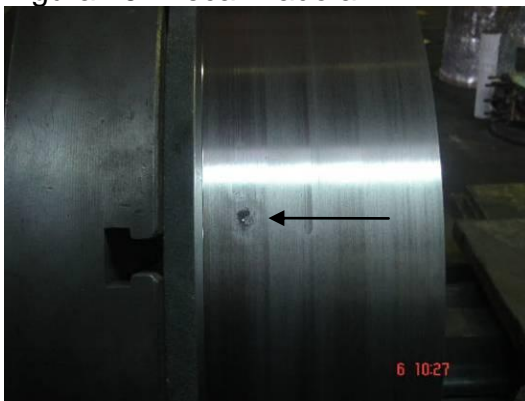


Figura 50. Mecanizado a 3 mm

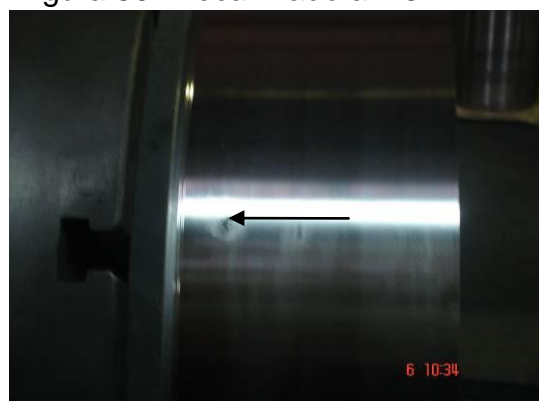


Figura 51. Mecanizado a 8 mm

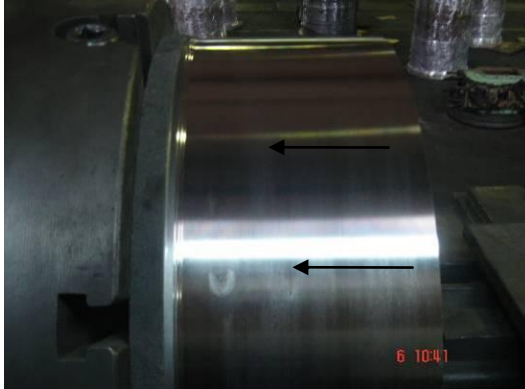


Figura 52. Mecanizado a 9 mm



Figura 53. Mecanizado a 10 mm

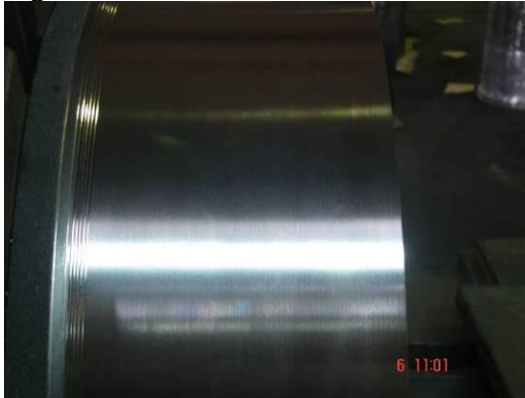
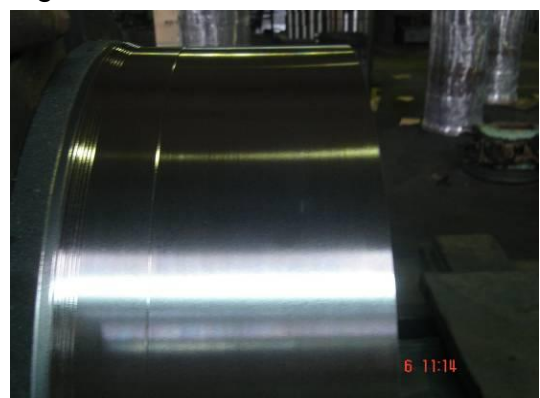


Figura 54. Mecanizado a 12 mm



En las siguientes tablas se resumen los defectos encontrados en cada zona en las que se dividió la camisa, según la profundidad del desbaste.

Tabla 6. Distribución de defectos. Zona 1

DESBASTE (mm)	PRESENCIA DE DEFECTOS		OBSERVACIONES	
	POROS	MANCHAS	REFERENCIA	COMENTARIO
6	X		Fig. 32	Presencia de primeros poros.
7		X	Fig. 33 y 34	Inicio de manchas.
8		X	Fig. 35	Las manchas se hacen mas evidentes

10		X	Fig. 36	Las manchas se unen alrededor.
11		X	Fig. 37	Las manchas son mas finas y siguen alrededor
13			Fig. 38	No hay presencia de defectos.

Tabla 7. Distribución de defectos. Zona 2

DESBASTE (mm)	PRESENCIA DE DEFECTOS		OBSERVACIONES	
	POROS	MANCHAS	REFERENCIA	COMENTARIO
2	X		Fig. 40	Presencia inmediata de poros.
4	X		Fig. 41	Mayor cantidad de poros.
6		X	Fig.42	Persiste la aparición de mancha.
10		X	Fig. 43 y 44	Inicio de manchas
11		X	Fig. 45	Extensión de las manchas.
13			Fig. 46	No hay presencia de defectos.

Tabla 8. Distribución de defectos. Zona 3

DESBASTE (mm)	PRESENCIA DE DEFECTOS		OBSERVACIONES	
	POROS	MANCHAS	REFERENCIA	COMENTARIO
1	X		Fig. 48	Inicio de poros.
2	X		Fig. 49	Continua la presencia de poros
3	X		Fig. 50	Los poros se desvanecen.
8		X	Fig. 51	Mayor cantidad de manchas.
9		X	Fig. 52	No hay mayor evidencia de manchas.
10			Fig. 53	La disminución de manchas es total.
12			Fig. 54	No hay presencia de defectos.

De las tablas de distribución de los defectos en las diferentes zonas, se aprecia que la mancha aparece hasta los primeros 13 mm de mecanizado. Por lo tanto solo por estudio se realizo hasta 13 mm, ya que estas camisas de la línea industrial requieren el desbaste de 10 mm para conseguir las dimensiones adecuadas para la pieza.

Debido a que los defectos en las camisas centrifugadas se presentaron en forma reiterativa, se seleccionó otra de las 7 piezas defectuosas. Esta selección se hizo basándose en el número y tamaño de los defectos. La camisa se dividió como se indicó anteriormente en 3 zonas. De estas zonas se escogió la zona 2 por ser más significativa la presencia de los defectos, de la cual se sacaron probetas, con las especificaciones indicadas para dichas pruebas. Otra razón para escoger la zona 2 para realizar pruebas metalográficas, SEM y DRX es que en dicha zona se encuentra el ataque para llenar el molde y éste es fijo, o sea, que es la zona más caliente térmicamente por el metal.

Los equipos utilizados en la fase experimental para el análisis de las probetas son: microscopio óptico cofocal 3D del centro de biomateriales UIS - CBIO, difractómetro y microscopio óptico de barrido, sus condiciones de operación, toma de datos y preparación de las probetas se especifican a continuación.

7.2 METALOGRAFÍA DE LA PROBETA

Para realizar el análisis metalográfico se tomó una muestra de la camisa realizando un corte transversal como se muestra en la figura 55. En la figura 56 se observa la sección a la cual se le realizó el análisis y la división de regiones luego de pulir la muestra. La probeta se preparó siguiendo la norma ASTM E3 “Guía para preparación metalográfica” y del Metal handbook, volumen 7. Metallographic Technique for Cast Irons.

Figura 55. Corte transversal para obtener la probeta

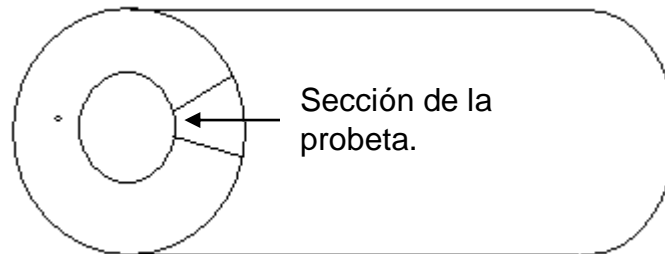
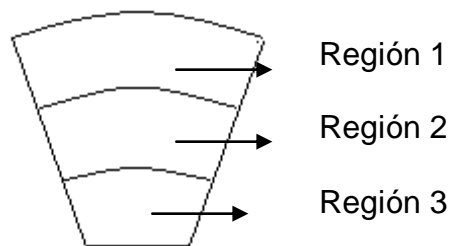


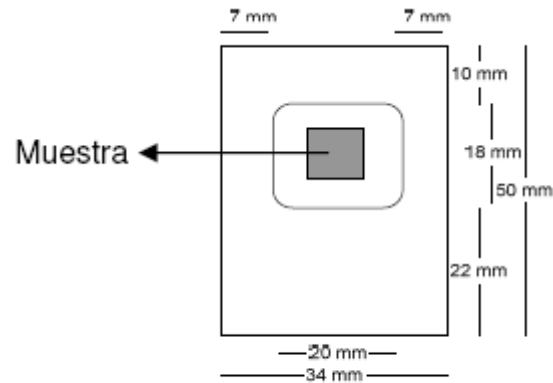
Figura 56. Sección de la probeta para análisis



7.3 DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX)

7.3.1. Preparación y Montaje de la muestra. Las muestras fueron montadas en un portamuestras de Aluminio de llenado frontal (ver figura 57) y se llevaron a cabo en la Escuela de Química de la UIS, laboratorio de rayos X.

Figura 57. Portamuestras de Aluminio



7.3.2. Toma de datos de difracción. Se realizó en un difractómetro de polvo marca RIGAKU modelo D/MAX IIIB bajo las siguientes condiciones:

Voltaje	40(kV)
Corriente	20(mA)
Rendijas (Slits)	DS 1.0°
	RS 0.3mm
	SS 1.0°
Muestreo	0.02° 2theta
Rango de Medición	2-70° 2theta
Radiación	CuKa1
Monocromador	Grafito

7.3.3 Identificación de fases.

Tipo de barrido	Continuo
Velocidad de Barrido	1.2°/minuto

El análisis cualitativo de las fases presentes en la muestra 1 y muestra 2 se realizó mediante comparación del perfil observado con los perfiles de difracción reportados en la base de datos PDF-2 del *International Centre for Diffraction Data (ICDD)*.

7.4 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM)

7.4.1. Preparación de la muestra. Se tomo una muestra de 2 x 2 cm en la cual se encontrara especificado tres zonas fundamentales, la zona de la mancha, la zona sin mancha y la interfase.

7.4.2. Toma de datos. El equipo usado es JEOL JSM5910 LV, con detectores BES y SEI, para la generación de imágenes y detectores EDS y WDS para análisis químico cuantitativo y cualitativo. Estos datos fueron tomados en el laboratorio de Materiales de la Universidad Nacional de Medellín.

8. ANALISIS DE LAS PROBETAS

8.1 ANÁLISIS METALOGRAFICO

Al realizar un barrido desde el exterior al interior tomando la probeta sin ataque químico con un aumento de 100x, según norma, para observar la forma y distribución del grafito, se detallaron regiones con varios tipos de hojuelas, entre los cuales se determinaron hojuelas de tipo D y E en la parte externa como se observa en la figura 58, en los cuales se presenta una segregación interdendrítica al azar para el tipo D y preferida para el tipo E. Esta conformación interdendrítica es debido a la alta velocidad de enfriamiento de la parte externa de la camisa.

Continuando con el barrido, en una zona intermedia en este caso región 2 de la probeta se observan las hojuelas de grafito tipo B, siendo fácil identificarlas debido a la formación en rosetas, conformación característica del tipo B mostrado en la figura 60. De igual manera también se observan hojuelas de grafito tipo A.

Al acercarnos al interior de la probeta, es decir la región 3 figura 62, se observa grafito tipo A en mayor proporción y tipo B en algunas zonas. El grafito tipo A, facilita su identificación debido a que presenta una distribución uniforme con orientaciones al azar. La presencia de grafito tipo A es deseable en las fundiciones ya que con él se obtienen las mejores características mecánicas.

Luego de esta inspección, se realizó un ataque con Ácido pícrico (picral) al 4% con un tiempo de ataque de 2 a 10 segundos, a 500x aumentos para apreciar la estructura. El procedimiento fue el mismo que sin ataque, haciendo el barrido en la misma dirección se encontró en la región 1 pequeñas zonas blancas de ferrita y

zonas oscuras de perlita. Adicionalmente se detectó la presencia de eutéctico fosforoso (esteadita), en pequeñas proporciones de la probeta figura 59. La esteadita está asociada a la presencia de fósforo y se forma generalmente en los bordes de grano ya que es la última fase en solidificar. Este compuesto es relativamente frágil.

La región 2 al ser atacada muestra la presencia de perlita fina, esteadita en mayor proporción que la observada en la figura 61. Al acercarnos a la región 3 continúa la presencia de perlita y esteadita observada en la región anterior como se observa en la figura 63.

Región 1:

Figura 58. Sección sin ataque a 100x

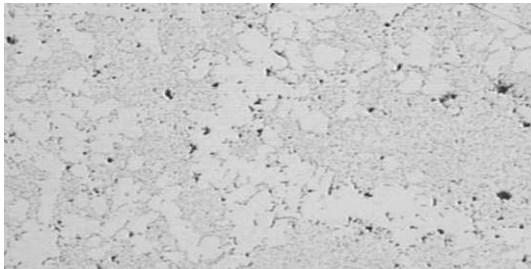
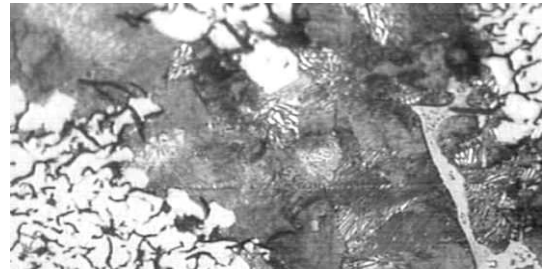


Figura 59. Sección atacada con picral 4% a 500x



Región 2:

Figura 60. Sección sin ataque a 100x

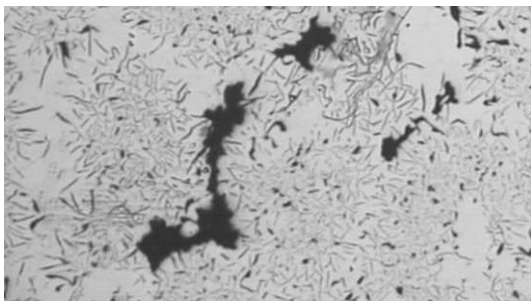
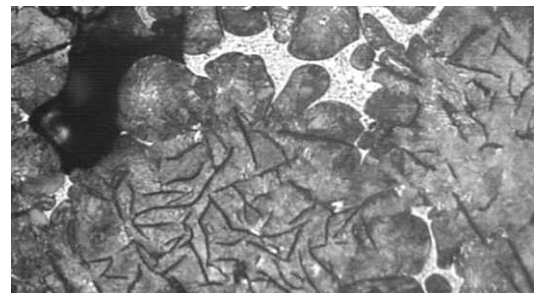


Figura 61. Sección atacada con picral 4% a 500x



Región 3:

Figura 62. Sección sin ataque a 100x

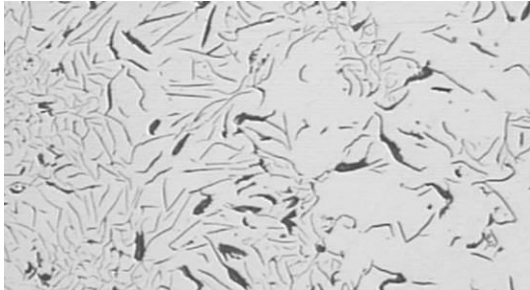
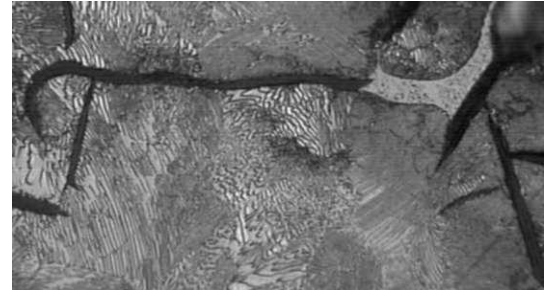


Figura 63. Sección atacada con picral 4% a 500

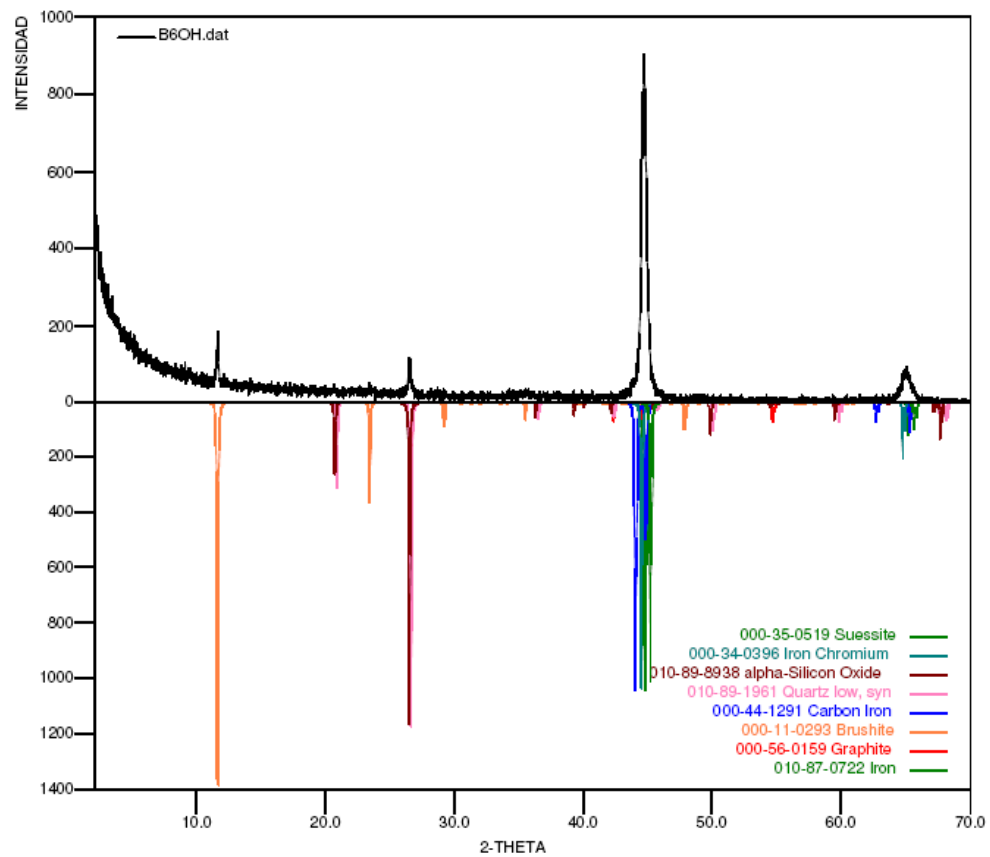


8.2 ANÁLISIS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX)

Este análisis se realizó con el fin de establecer la naturaleza de la mancha.

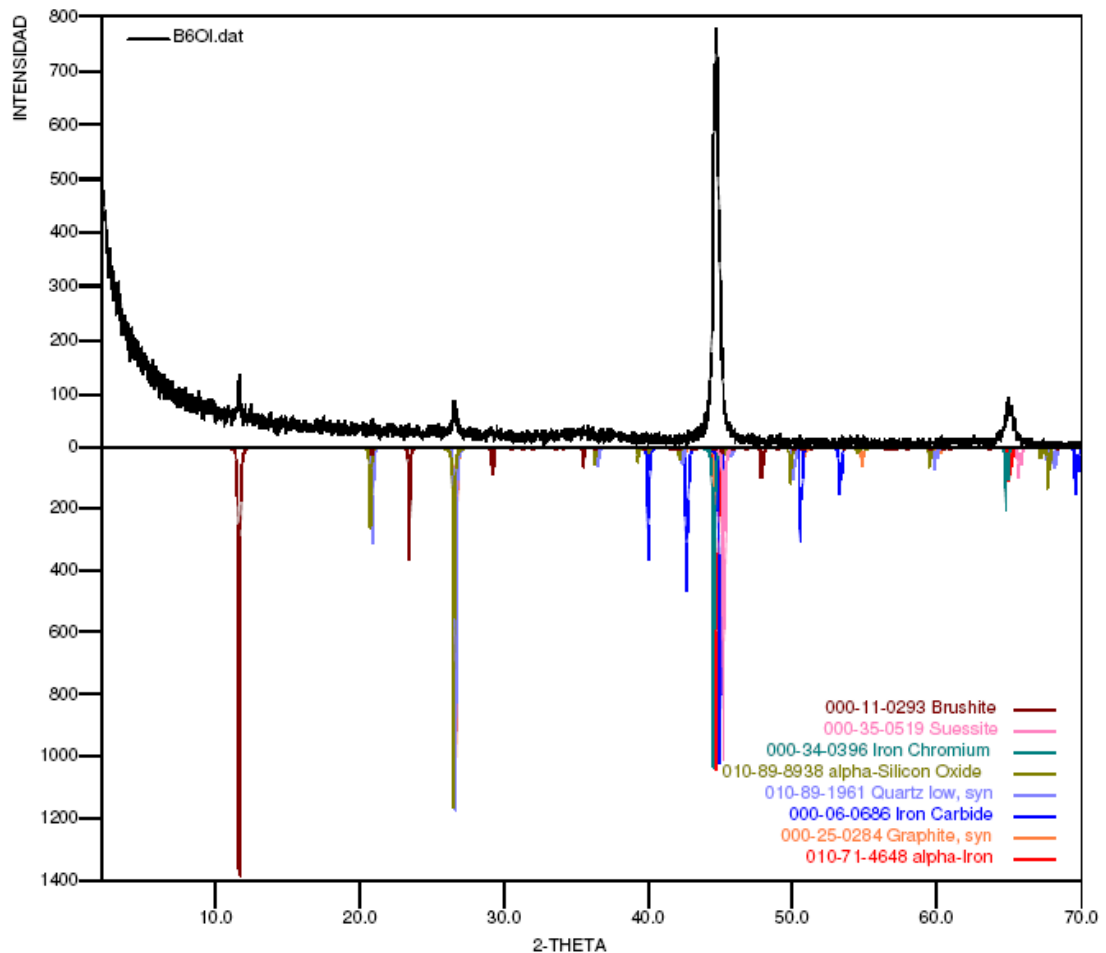
Muestra 1 de la zona 2.

	FASE	No. TARJETA PDF-2	NOMBRE
Cristalinos	Fe	010-87-0722	Hierro
	C	000-56-0159	Grafito
	Ca PO ₃ (OH) 2.H ₂ O	000-11-0293	Brushita
	C _{0.08} Fe _{1.92}	000-44-1291	Carburo de Hierro
	Fe-Cr	000-34-0396	Hierro-Cromo
	Si O ₂	010-89-1961	Cuarzo
	Si O ₂	010-89-8938	Oxido de Silicio
	Fe ₃ Si	000-35-0519	Suessita



Muestra 2 de la zona 2.

	FASE	No. TARJETA PDF-2	NOMBRE
Cristalinos	Fe	010-71-4648	Hierro
	C	000-25-0284	Grafito
	Ca PO ₃ (OH) 2.H ₂ O	000-11-0293	Brushita
	C _{0,08} Fe _{1,92}	000-06-0686	Carburo de Hierro
	Fe-Cr	000-34-0396	Hierro-Cromo
	Si O ₂	010-89-1961	Cuarzo
	Si O ₂	010-89-8938	Oxido de Silicio
	Fe ₃ Si	000-35-0519	Suessita



De lo anterior se muestra la presencia de compuestos extraños tanto en la muestra 1 como en la muestra 2, llamada brushita, el cual es un fosfato de calcio ($\text{CaPO}_3(\text{OH}) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), de igual manera hay pequeñas cantidades de cromo disuelto en la ferrita y un poco de carburo de hierro. Los demás compuestos presentes son característicos de una fundición y es clara su presencia.

Debido a estos resultados, la brushita puede provenir del unto o pintura del molde. De ser un compuesto hidratado y tener en su composición un radical OH puede descomponerse durante la colada y originar poros en las piezas.

8.3 ANÁLISIS DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM)

El análisis se realizó en una probeta con dimensiones de 2*2 cm de sección, donde a simple vista se aprecia la región sin mancha, la interfase y la región con mancha. Esta probeta no se preparó metalográficamente con el fin de evitar la desaparición del defecto.

8.3.1 Región sin mancha. El número de iteraciones fue 3. Se observa el predominio de una parte blanca en ambas figuras 64 y 65. Según la composición química se encuentran presentes los elementos normales de una fundición: carbono, silicio, manganeso, azufre y hierro, este último en mayor porcentaje alrededor de 87% en la figura 64 y 86% en la figura 65 como es de esperarse.

Figura 64. Micrografía en la región sin mancha toma 1

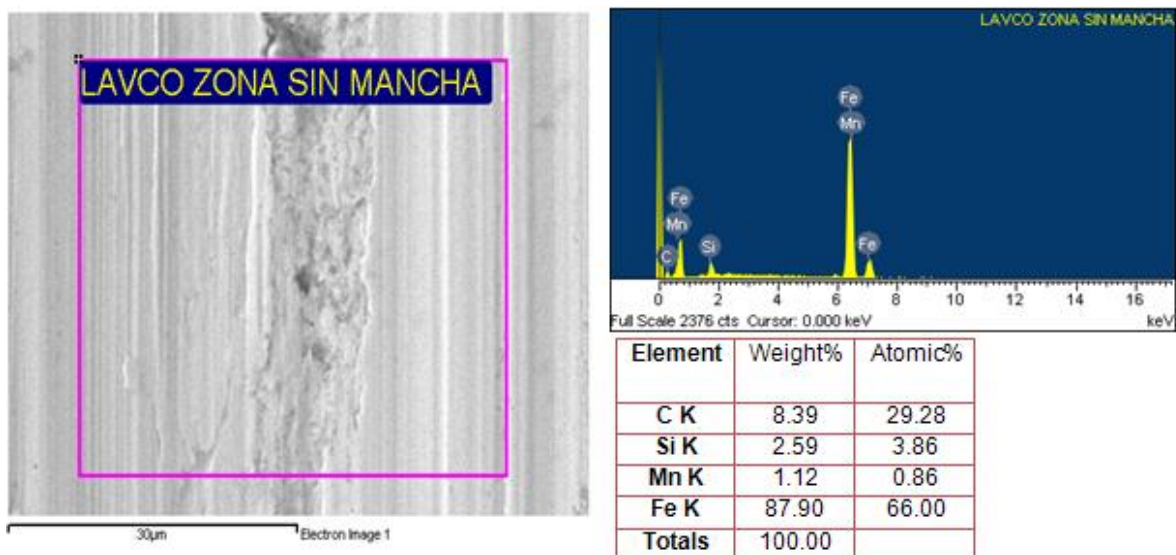
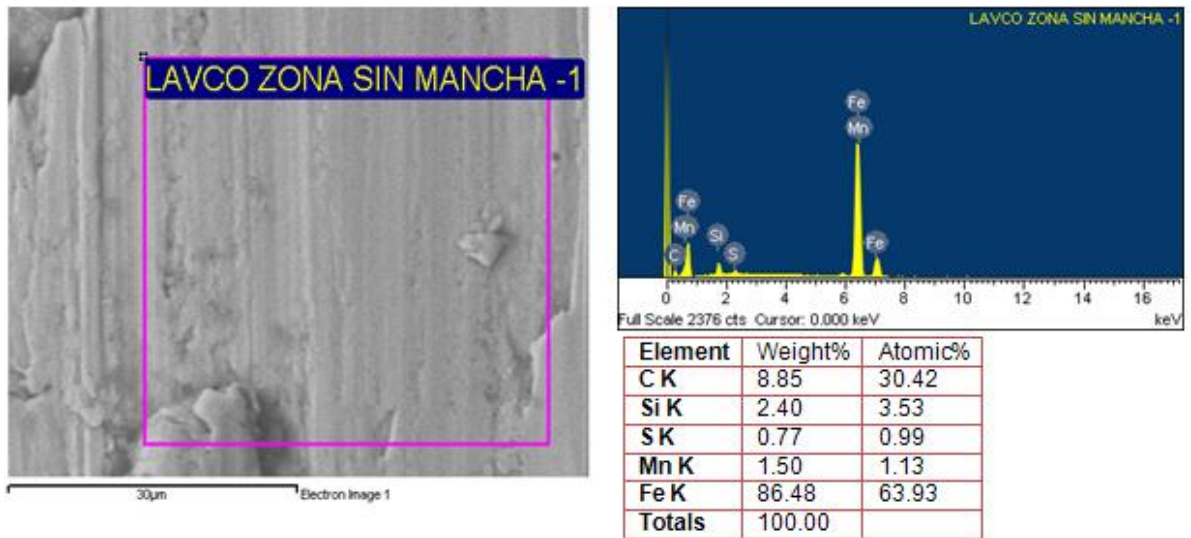


Figura 65. Micrografía en la región sin mancha toma 2



8.3.2 Región de interfase. En esta región en general están presentes los elementos normales de las fundiciones. Se encontraron dos elementos extraños, el Cl y el Br. Figura 66. La presencia del Cl podría originarse en el agua utilizada en la preparación del unto. Con relación al Br no se explica su presencia. En otro punto del barrido se analizó la parte blanca y se obtuvo el carbono, silicio y hierro, conformando la matriz de la fundición como se observa en la figura 67.

La presencia de puntos blancos no pudo evaluarse, sin embargo, el análisis no mostró inclusiones que pudieran relacionarse con dichos puntos, en ninguna de las tres regiones.

Figura 66. Micrografía en la interfase toma 1

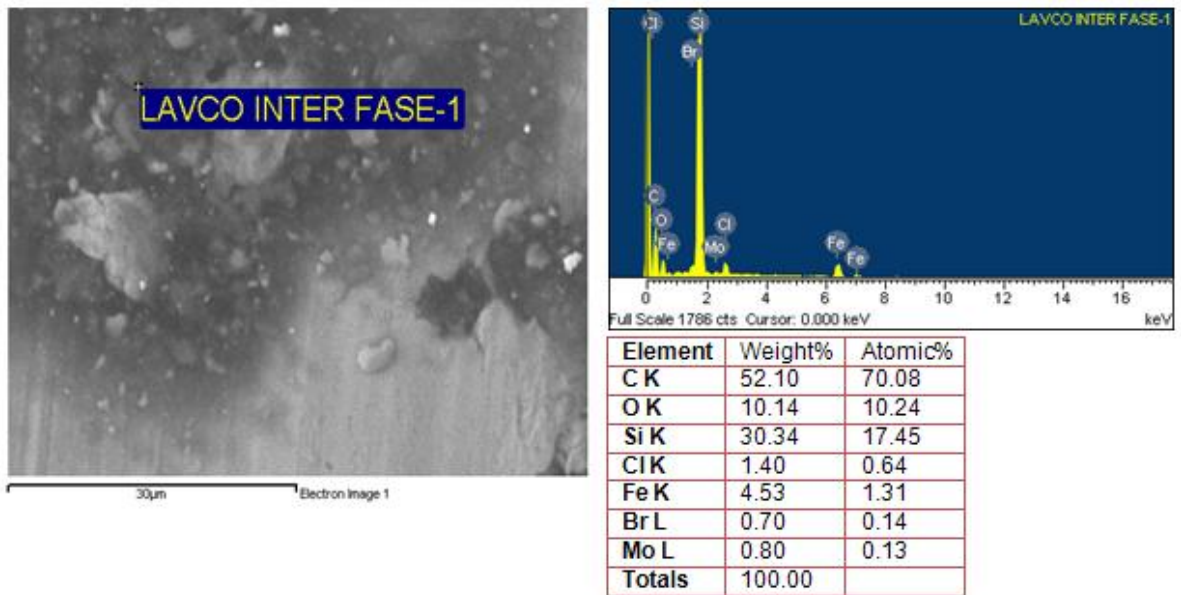
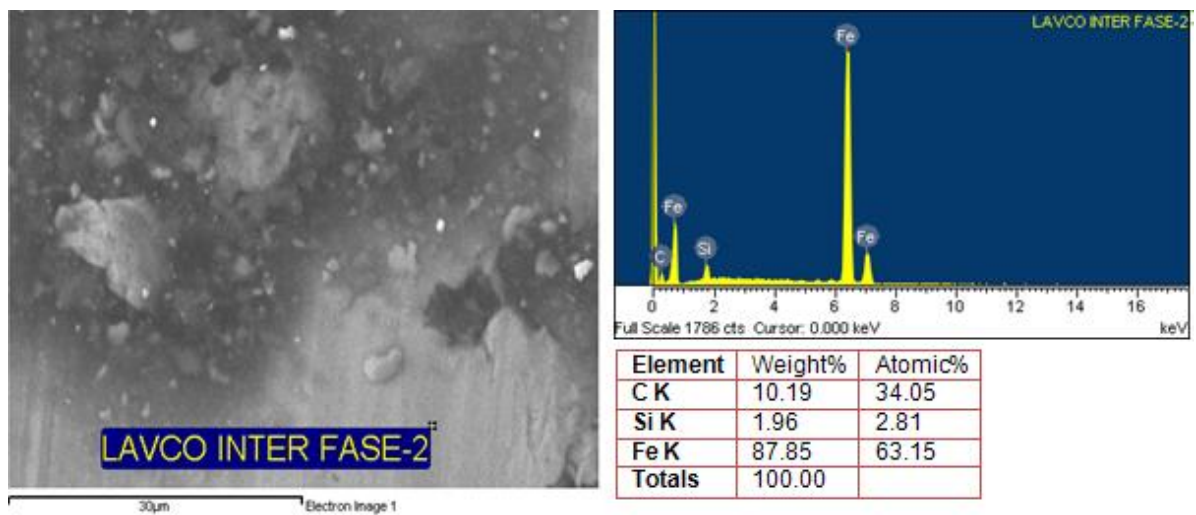


Figura 67. Micrografía en la interfase toma 2



8.3.3 Región con mancha

La figura 68 muestra elementos normales en la composición química de una fundición como el carbono, oxígeno, silicio y un porcentaje mayor de hierro en un 69.42%. A diferencia de la figura 69 donde están presentes elementos no esperados como el Cl con un 0.97% y el alto contenido de Al 0.61%, de igual manera están presentes el carbono, oxígeno y silicio en mayor cantidad que la figura 68. Adicional a estos se encuentra el fósforo y un 52.85% de hierro en menor cantidad que en la figura 69.

Figura 68. Micrografía en la región de la mancha toma 1

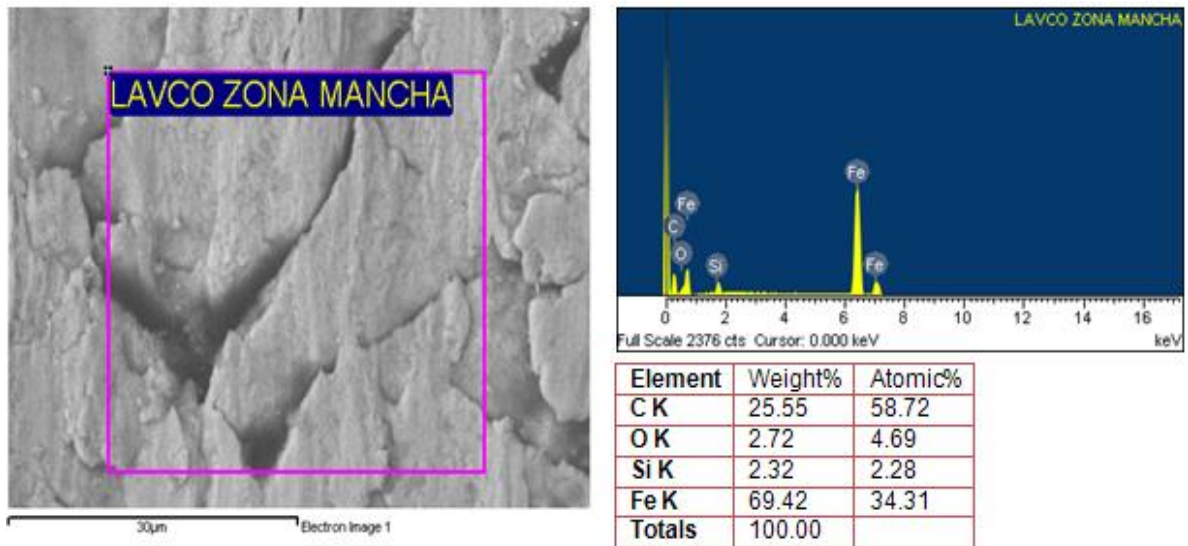
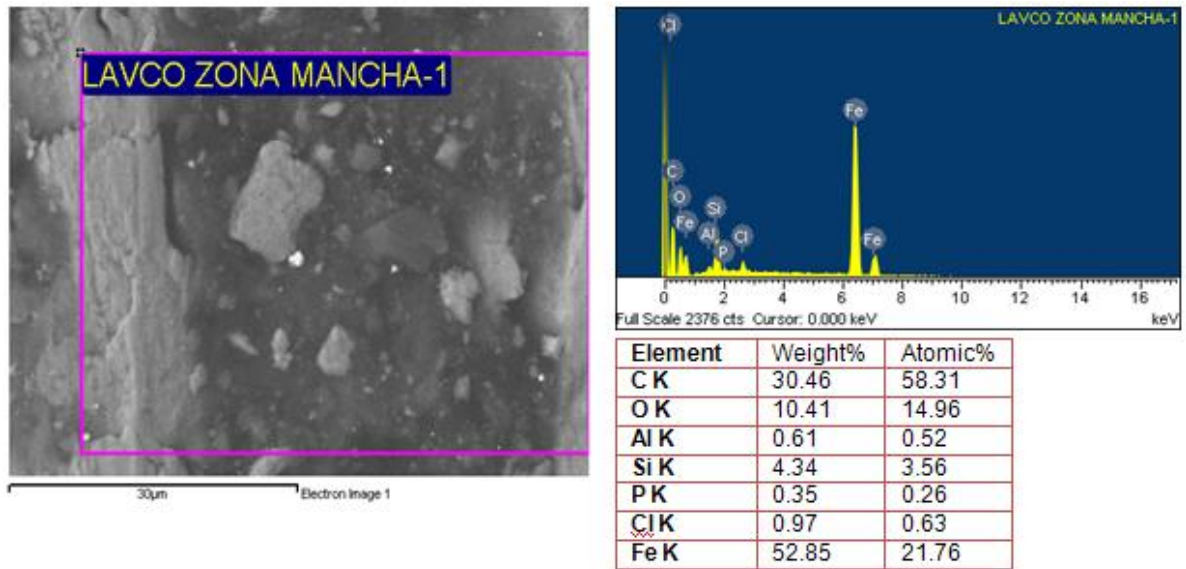


Figura 69. Micrografía en la región de la mancha toma 2



8.4 ANALISIS DE DUREZA

Se tomó una probeta donde es visible la mancha y su interfase, de esta manera se realizó tres tomas en cada región, resultando una dureza de 200 HB en la superficie externa de la interfase, 201 HB en la interfase y 210 HB en la mancha. Lo anterior demuestra que aunque hay cierta diferencia de dureza entre la interfase y la mancha, la región de la mancha no es más dura que el resto de la camisa y por tal motivo se comprueba que estos datos no son significativos para el análisis.

9. PRUEBAS REALIZADAS

Para resolver los problemas presentados en las camisas obtenidas por centrifugación, se procedió a variar dos parámetros: uno de carácter operativo y otro relacionado con el contenido de silicio.

9.1 SISTEMA DE LLENADO

Los resultados obtenidos en la etapa del desarrollo experimental, permiten establecer que la mayor cantidad de defectos se presenta en la zona 2. Esto debido a que el ataque se produce en esta zona produciendo un calentamiento excesivo en esta sola zona, lo cual ocasiona el desprendimiento del refractario que podría ser la causa de la aparición de poros ya que en su análisis visual se observa en su interior una zona blanca y no lisa, con la cual se determina que estos son provenientes del unto debido al sobrecalentamiento permitiendo que el revestimiento se desprenda por el choque térmico.

Figura 70. Sistema de llenado original



Adicional a las razones mencionadas, por documentación bibliográfica de asesores externos, la fundición centrífuga tiene mayores ventajas y disminuye la presencia de defectos mientras mas corto sea el tiempo de llenado, el cual varia según el sistema de llenado. De acuerdo a esto, la variable a modificar es el sistema de llenado evitando el calentamiento excesivo en una sola zona y de igual manera reducir el tiempo de llenado.

Para resolver el problema se realizó una modificación en dicho sistema, que convirtió por medio de una manivela manual mostrado en la figura 71, mover el sistema de llenado mientras ocurre la colada del molde; de esta manera, se busca no calentar en exceso una parte del molde sino que el calentamiento ocurra en todo el molde y así evitar el desprendimiento del unto.

Figura 71. Sistema de llenado modificado



9.2 CANTIDAD DE SILICIO

Debido a los resultados del análisis de SEM en la zona de la mancha, en el cual se observa la gran cantidad de silicio y su falta de homogeneidad variando de 2.59% a 4.3%, se vio la necesidad de controlar la composición química antes de colarlas utilizando el análisis térmico.

Por tal razón se verificó el porcentaje de silicio que se encontraba en un rango de 2.5 a 2.7%, datos suministrados por el multilab y comparando los porcentajes adecuados para la fabricación de las camisas y corroborando lo especificado según norma NTC 1448 regida por la empresa para la fabricación de camisas centrifugadas, se determinó que este porcentaje estaba alto y lo mas conveniente era controlarlo disminuyéndolo a 2.2% sin salirse del rango.

Tabla 9. Composición Química

Elemento	%
C	2.95-3.70
Si	1.80-3.10
Mn	0.40-1.20
S	0.14 máx.
P	0.95 máx.
Cr	1.0 máx.
Cu	1.5 máx.
Ni	1.5 máx.
Mo	1.0 máx.

Fuente: NTC 1448. Recomendación básica de la composición química de una aleación hierro – carbono correspondiente a una fundición gris para camisas centrifugadas.

10. RESULTADOS

Los cambios se hicieron en la colada de tres camisas centrifugadas, las dos primeras modificando las dos variables por separado y la tercera modificando la variable simultáneamente, de la cual se obtuvo los mejores resultados y se encuentra en más detalle. Por tal motivo se realizaron los mismos cortes de las tres zonas, pero se encuentra registrada solo la zona 2, por ser esta zona donde se presentaba en mayor proporción los defectos para el estudio y posterior mecanizado, de igual manera se tomaron los mismos mm de mecanizado tomados en el desarrollo experimental para tener un patrón de comparación con el fin de verificar su efectividad.

Zona 2:

Figura 72. Sin mecanizar



Figura 73. Mecanizado a 2 mm



Figura 74. Mecanizado a 4 mm



Figura 75. Mecanizado a 6 mm



Figura 76. Mecanizado a 10 mm



Figura 77. Mecanizado a 11 mm



Figura 78. Mecanizado a 13 mm



Tabla 10. Distribución de defectos. Zona 2

DESBASTE (mm)	PRESENCIA DE DEFECTOS		OBSERVACIONES	
	POROS	MANCHAS	REFERENCIA	COMENTARIO
2	X		Fig. 73	Solo un poro en toda la sección de la zona
4			Fig. 74	Ningún tipo de defecto
6			Fig. 75	Ningún tipo de defecto
10			Fig. 76	Presencia de una pequeña mancha
11		X	Fig. 77	Extensión de la mancha.
13		X	Fig. 78	Alargamiento de la mancha y disminución de la tonalidad.

De igual manera se tomó una probeta para verificar si la estructura del grafito sufrió alguna modificación después de dichos cambios, realizando un barrido mas detallado desde el exterior al interior. El aumento según norma ASTM- A 48 es exactamente 100x para clasificar el tipo de grafito, pero el microscopio utilizado no tenia el aumento especificado y se procedió a realizar el barrido a un aumento un poco superior de 140x.

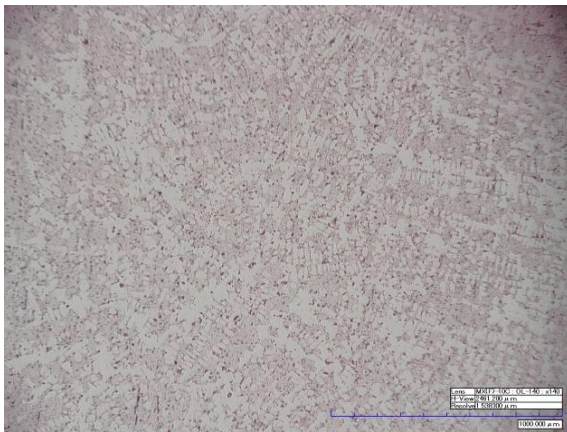
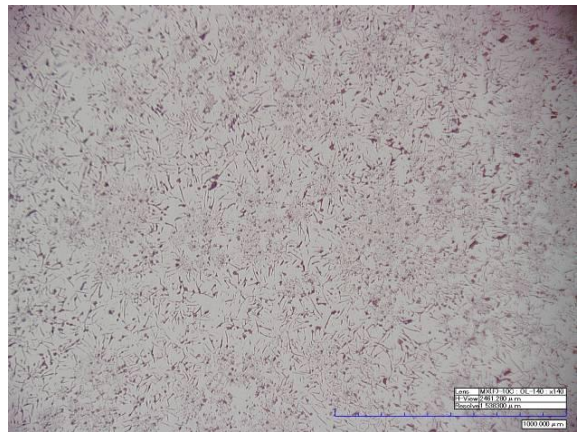
 Figura 79. Sección de la parte Exterior
140x

 Figura 80. Sección antes del centro
140x


Figura 81. Sección de la parte Exterior
140x

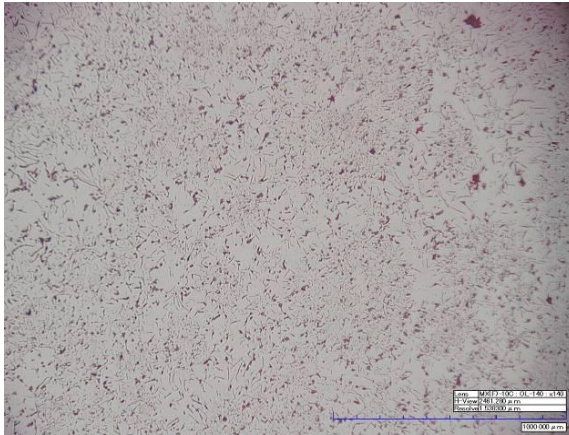


Figura 82. Sección antes del centro
140x

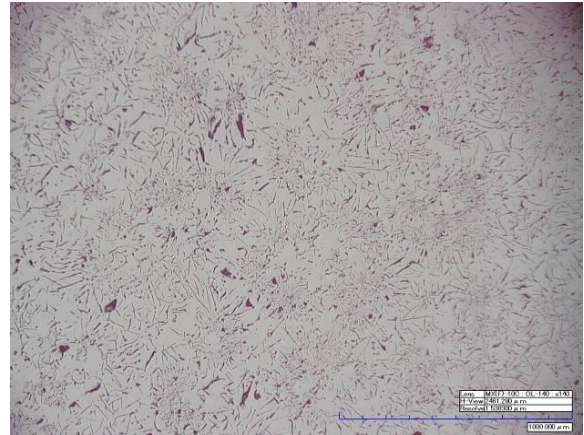
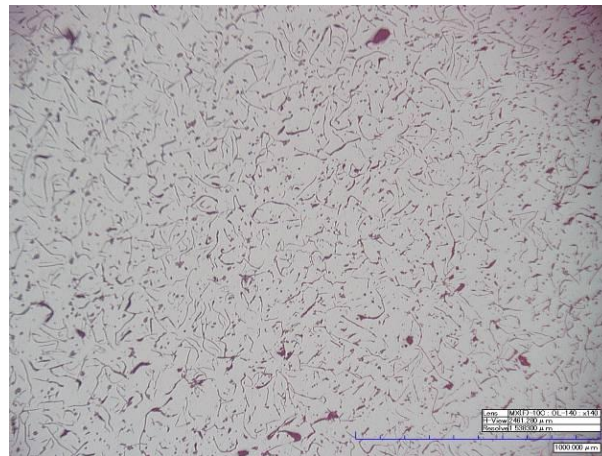


Figura 83. Sección de la parte Interior 140x



11. ANALISIS DE RESULTADOS

Después de realizar el mecanizado con los cambios que se realizaron, se demostró una disminución total de la presencia de poros, aunque no se eliminaron las manchas se logró disminuir su extensión en comparación con la etapa del desarrollo experimental y de este modo disminuir el porcentaje de rechazo, comprobando la efectividad del cambio en el sistema de llenado y la variación en la cantidad de silicio.

Adicional a esto se disminuyó el tiempo de llenado de 49 seg a 28 seg, por consiguiente se aumentó la velocidad de llenado, una variable importante en la fabricación de las camisas centrifugadas según documentación bibliográfica basada en empresas del exterior especialistas en fundición centrífuga, los cuales tienen implementado el sistema y tiempo de llenado, ya que este aumento permite un llenado homogéneo antes de que el metal se solidifique y disminuya el riesgo de presentar problemas de defectos.

Las micrografías obtenidas comprueban en la sección de la zona exterior, hojuelas de grafito tipo D, debido a un enfriamiento rápido. La zona antes y después del centro, muestra la presencia de hojuelas de grafito tipo A y B, pero el grafito tipo B en mayor proporción después del centro ya que se aprecia más formación de rosetas. En la zona interior predomina el grafito tipo A, fundamental para proporcionar mejores propiedades mecánicas, asegurando que los cambios arrojaron buenos resultados sin modificar la estructura de la pieza garantizando el buen funcionamiento de la misma.

De la prueba de mecanizado, se observa claramente que a los 6 mm de profundidad, la camisa no presenta ningún defecto, lo que quiere decir es que se

podría rediseñar las dimensiones de la coquilla, para que solo sea necesario realizar el desbaste a esa profundidad y con esto garantizar una pieza libre de defectos, además de otros beneficios de tiempo, costos, mano de obra, etc.

12. CONCLUSIONES

- ❖ La variable de mayor influencia durante el proceso, es el método de llenado, el cual debe realizarse en el menor tiempo posible mediante un ataque móvil, con el fin de reducir el gradiente térmico entre las diferentes zonas de la pieza y disminuir el tiempo de llenado, de igual manera debe ser uniforme, para evitar alteraciones que conlleven a la aparición de los defectos características de este tipo de fundición.
- ❖ Del análisis de SEM se concluye que en la preparación del unto refractario debe utilizarse como solvente agua destilada, para evitar la presencia de cloro en las fundiciones.
- ❖ De los análisis de SEM y DRX se determino que los defectos presentes en las camisas centrifugadas, están directamente relacionados con la reacción del metal líquido y el unto refractario.
- ❖ Las camisas centrifugadas solo requieren 6 mm de mecanizado en lugar de 10 mm, lo cual se traduce en una disminución de costo, en mano de obra, materiales de herramienta y menor peso en la pieza fundida, mejorando el tiempo de entrega en las piezas.

13. RECOMENDACIONES

- ❖ Usar un refractario más estable al calor que la arena sílice (SiO_2) en el unto, como cromita, zirconita, chamota y olivita. Estos materiales no sufren transformaciones durante el calentamiento.
- ❖ Antes de cada fundición es necesario limpiar la coquilla, se recomienda hacer la limpieza usando grafito mas alcohol, antes de la aplicación del unto refractario, previniendo el desprendimiento de la misma.
- ❖ Determinar el carbono equivalente antes de adicionar el inoculante y verificar la cantidad del silicio ya que este modifica las propiedades dependiendo del porcentaje presente.
- ❖ Controlar la compra de la chatarra en cuanto a los elementos que contienen ya que algunos de estos afectan el proceso, caso especial del fósforo que aunque aumenta la colabilidad, es un elemento que se segrega en los límites de grano.
- ❖ Mantener el contenido de aluminio en valores menores del 0.1%.
- ❖ No utilizar como inoculante el ferrosilicio en condiciones normales, sino con algunos elementos de aleación como el Ca y Ba.
- ❖ Utilizar agua destilada en la preparación del unto.

14. PROTOCOLO DE ACTIVIDADES PARA MINIMIZAR LA APARICIÓN DE LOS DEFECTOS

1. Introducir la materia prima previamente seleccionada, evitando el aumento de elementos perjudiciales para el proceso como el silicio y el fósforo.
2. Calentar la coquilla a la temperatura adecuada por un tiempo de 2 horas y una temperatura de 290 °C, con el fin de evitar un fuerte choque térmico.
3. Limpiar la coquilla con presión de aire y ponerla a girar a una velocidad determinada antes de cada colada, la limpieza se realiza mezclando grafito y alcohol.
4. Aplicar la doble capa de refractario a una temperatura alrededor de 250°C para evitar que el metal se pegue a las paredes de la coquilla y produzca defectos característicos en las piezas.
5. Disminuir la velocidad centrifuga hasta cero y con la ayuda del puente grúa y de los operarios colocar la tapa a la coquilla.
6. Adicionar el dispositivo de llenado, en el cual el movimiento de la manivela debe ser lo mas uniforme y constante posible para asegurar un llenado homogéneo.
7. Una vez ha sido picado el horno adicionar al chorro el inoculante base ferrosilicio en polvo con 75% de silicio, verificando la cantidad en relación con el carbono equivalente.

8. Transportar el caldero por el puente grúa hasta el lugar donde se encuentra la coquilla y controlar el tiempo de transporte una vez se ha adicionado el inoculante sin exceder los 10 seg para asegurar la eficiencia.
9. Realizar el vaciado del metal en la coquilla con la maquina centrifuga en funcionamiento, tratando de evitar al máximo que se desperdicie metal y con una duración aproximada de 28 segundos.
10. Una vez terminada la solidificación, extraer la pieza a una temperatura de 956°C, retirando la tapa de la coquilla.
11. Finalmente llevar la pieza a una cama de arena para realizar un proceso de mecanizado hasta lograr las dimensiones requeridas.

BIBLIOGRAFIA

Textos

- ❖ ALONSO, Arnaldo. Las propiedades de la fundición. Ediciones UIS. Bucaramanga. 1998.
- ❖ AMERICAN FOUNDRYMENT'S ASSOCIATION, Cast Metal Handbook. Chicago. 1940.
- ❖ APRAIZ, José. FUNDICIONES. Editorial Dossant. Madrid. 1960.
- ❖ JANCO. N, Centrifugal Casting, Editorial. American Foundry Society. Des Plaines. USA 1992. pag 1-6, 39-40, 65-72.
- ❖ Kumar, R:L; "Process Variables and Quality Control in the Centrifugal Casting of Cooper Alloys," The British Foundry man, January 1971.
- ❖ R. Beeley. Foundry technology, Department of Metallurgy, Universidad of Leeds. First edition 1976, pag 491-509.

Consultoría Externa

- ❖ HENDERIECKX, Staf. Gietech BV. IRON IMPORTANCE OF CARBON AND SILICON. Holanda. 2006.

- ❖ HENDERIECKX, Staf .Gietech BV. INOCULATION GREY AND DUCTILE IRON. Holanda. 2006.
- ❖ HENDERIECKX, Staf .Gietech BV. CHEMISTRY OF GREY IRON. Holanda. 2006.
- ❖ HENDERIECKX, Staf .Gietech BV. FAILURES IN CENTRIFUGAL CAST GREY. Holanda. 2006.

Normas

- ❖ ASTM A 48 - 03. “Standard Specification for Gray Iron Castings”.
- ❖ ASTM E 03 - 01. “Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens”.
- ❖ ASTM A 247 - 06. “Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings”.
- ❖ INSTITUTO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION (Colombia). Camisa de hierro fundido para motores de combustión interna. NTC 1448. Bogotá: ICONTEC, 2007-06-20. 1-8p.