

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA A PRUEBA DE UN PROTOTIPO DE UN
SISTEMA DE FUNDICIÓN DE HIERRO GRIS POR CENTRIFUGADO**

Jorge Pérez Royero



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2015

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA A PRUEBA DE UN PROTOTIPO DE UN
SISTEMA DE FUNDICIÓN DE HIERRO GRIS POR CENTRIFUGADO**

JORGE PÉREZ ROYERO

Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero
Mecánico

Director
Rolando Guzmán López
Ingeniero Mecánico

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA
2015**

Nota de Aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del Jurado

Bucaramanga 17 de marzo de 2015

DEDICATORIA

A mis padres Jorge William y Luzmila por la formación integral recibida, a mi familia que me brindo el constante apoyo para culminar con éxito mi carrera, y sobre todo a Andrea Carolina que me enseñó la perseverancia para conseguir los objetivos, este logro pertenece a mi empresa que hizo posible mi desarrollo personal y profesional.

(Pérez Royero, Jorge)

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos al plantel de docentes de la Universidad Pontificia Bolivariana, en especial a los ingenieros Miguel Ángel Reyes Orozco, Rolando Guzmán López, Edwin Córdoba Tuta, Alfonso Santos y Juan Manuel Arguello por los conocimientos aportados para la formación profesional de Ingenieros mecánicos. También a los directivos de la Empresa De Williams Servicios que apoyo en cada paso del desarrollo de este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION	14
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
3. OBJETIVOS	16
3.1 Objetivo general	16
3.2 Objetivos específicos	16
4. MARCO TEORICO	18
4.1 Teoría de Fundición: Moldeo por colada centrifugado	18
4.2 Análisis Dinámico	19
4.2.1 Cinemática de la rotación alrededor de un eje fijo	19
4.2.2 velocidad angular instantánea	20
4.2.3 Mecánica de Fluidos	20
4.2.4 Ley de newton de la viscosidad	20
4.2.5 Ley de newton de esfuerzo cortante para un fluido	21
4.3 Análisis de Transferencia de Calor	22
4.3.1 Transferencia de Calor por conducción	22
4.3.2 Transferencia de Calor por convección	23
4.4 Fundición	23
4.4.1 Solidificación	24
4.4.2 Efectos Estructurales	24
4.4.3 Fundiciones de hierro	26
4.4.4 Microconstituyentes de las fundiciones	27
4.4.5 Fundición Gris	29
5. DISEÑO DEL SISTEMA DE FUNDICION CENTRÍFUGO	35
5.1 Parámetros de diseño	36
5.1.2 Velocidad de rotación del molde	36
5.1.3 Temperatura durante el proceso de Fundición	37
5.1.4 Dimensionamiento Estructural	38
5.1.5 Tiempo de Fundición	39

5.2	Diseño y selección de los elementos del Sistema de Fundición.....	39
5.2.1	Diseño Preliminar del Sistema de fundición.....	40
5.2.2	Caracterización y selección del sistema de fundición	41
5.2.3	Análisis de Cargas presentes en el sistema.....	43
5.2.4	Calculo del sistema de transmisión.....	47
5.2.2	Selección del tipo de transmisión.....	49
5.2.3	Selección de Piñones para el Sistema de Transmisión.....	54
5.2.4	Diseño del eje para el sistema de transmisión	56
5.2.5	Validación numérica de los esfuerzos sobre eje	60
5.2.6	Selección de los Rodillos del sistema de Transmisión	66
5.3	Caracterización del molde de fundición.....	67
5.3.1	Selección del Molde de Fundición	67
5.3.2	Determinación del diámetro exterior del molde	68
5.3.2	Validación analítica del espesor del molde	70
5.3.3	Determinación del Valor la fuerza centrífuga.....	70
5.3.4	Validación numérica del molde	71
5.3.5	Velocidades de Rotación durante el proceso de fundición	77
5.4	Diseño del Vertedero	79
5.4.1	Análisis de necesidades del Vertedero	79
5.4.2	Dimensionamiento del Vertedero.....	80
5.4.3	Selección del Material Canal de Vertedero	80
5.5	Diseño de la estructura de soporte externa.....	80
5.5.1	Validación numérica de la estructura externa	81
6.	CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DEL SISTEMA DE FUNDICIÓN.....	84
6.1	Compra de Materiales	85
6.2	Corte de los Materiales	86
6.3	Proceso de soldado y construccion	86
6.4	Fabricación del vertedero	87
7.	PRUEBAS DEL PROTOTIPO DE FUNDICIÓN CENTRIFUGA.....	90
7.1	Ejecución del proceso.....	90
7.2	Análisis Térmico del proceso	91
7.2.1	Proceso de Enfriamiento.....	91

7.3 Simulación de Transferencia de Calor	91
7.3.1 Análisis de Malla.....	93
7.3.2 Definición de condiciones	94
7.3.3 Análisis de	94
7.4 Producto Final y post- proceso.....	97
7.4.1 Post- proceso de Fundición	97
8. RESULTADOS	99
9. OBSERVACIONES	100
10. CONCLUSIONES.....	101
11. RECOMENDACIONES	102
12. ANEXOS	103
Anexo A	103
Anexo B	119
Anexo C.....	122
Anexo D.....	124
13. Bibliografía	130

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Gráfica de Cinemática de Rotación de eje	19
Figura 2. Esquema del Gradiente de Velocidad de un Fluido entre dos Placas.....	21
Figura 3 Transferencia de Calor por convección hacia una superficie.....	23
Figura 4. Ilustración esquemática de la Solidificación	25
Figura 5. Esquemático de Tipos de Granos presentes.....	26
Figura 6. Fractura Presente en una Fundición de Hierro Dúctil	27
Figura 7. Diagrama Hierro-Carbono estable.....	28
Figura 8. Rastros de Ledeburita Eutéctica 500x.....	29
Figura 9. Clasificación de las fundiciones grises según la norma ASTM A48-41	30
Figura 10. Ensayo de Tracción	32
Figura 11. Eje de Levas en fundición de hierro gris.....	33
Figura 12. Camisas de Hierro gris terminas	34
Figura 13. Máquina de Fundición centrifuga real.....	35
Figura 14. Isométrico de la Camisa de 26,5"	39
Figura 15. Opción 1: Centrifuga Vertical.....	40
Figura 16. Opción 2: Centrifuga Horizontal	40
Figura 17. Descripción del Centrifugado horizontal	41
Figura 18. Análisis de Carga que Intervienen en el Sistema	43
Figura 19. Determinación de Dimensiones del sistema de fundicion	44
Figura 20. Tabla de Selección Motores WEG W22	48
Figura 21. Sistema de Transmisión por Cadenas.....	49
Figura 22. Determinación de los Valores del Sistema de Transmisión	50
Figura 23. Rueda conducida dimensiones	51
Figura 24. Catálogo de cadenas SKF serie Xtra	52
Figura 25. Caracterización de los Piñones	55
Figura 26. Diagrama de Cargas sobre el eje	56
Figura 27. Diagrama de cuerpo libre	57
Figura 28. Propiedades Acero 1020 Ferrocortes.....	58
Figura 29. Asignación de materiales al modelo por medio de Solidworks	61
Figura 30. Ventana del Análisis de Ansys	61
Figura 31. Enmallado utilizado en la simulación del eje del sistema de transmisión...	62
Figura 32. Componentes del proceso de mallado	62
Figura 33. Cargas aplicadas a la simulación del eje del sistema de transmisión	63
Figura 34. Determinación de los factores a solucionar	64
Figura 35. Resultados obtenidos de la simulación estática	65
Figura 36. Acercamiento de la simulación estática.....	66
Figura 37. Molde de fundición para camisa.....	68
Figura 38. Caracterización del análisis estructural	72
Figura 39. Determinación de las condiciones de contacto.....	72

Figura 40. Enmallado utilizando en la simulación de ensamblaje	73
Figura 41. Detalles del proceso de mallado	74
Figura 42. Cargas aplicadas a la simulación del sistema de fundición	74
Figura 43. Geometría del Molde de la Camisa	75
Figura 44. Determinación de los factores a analizar	75
Figura 45. Análisis de resultados, prueba de deformación	76
Figura 46. Fundición Centrifuga	79
Figura 47. Dimensionamiento de la estructura externa	81
Figura 48. Selección del tipo de contacto más adecuado para la estructura externa	81
Figura 49. Descripción de las cargas aplicadas al sistema.....	83
Figura 50. Análisis estructural del marco de soporte Centrifuga.....	83
Figura 51. Plan de Trabajo.....	84
Figura 52. Esquemático de los Materiales Utilizados	85
Figura 53. Isométrico del travesaño de la base	86
Figura 54. Montaje de la plataforma e instalación de los rodillos.....	86
Figura 55. Travesaño instalado	87
Figura 56. Dimensionamiento de la base del vertedero.....	87
Figura 57. Dimensionamiento del brazo giratorio	88
Figura 58. Dimensionamiento de la cuchara del vertedero.....	88
Figura 59. Vertedero construido para el sistema centrífugo	89
Figura 60. Sistema de Centrifugado Terminado.....	89
Figura 61. Sistema de Fundición Centrifuga con el molde de camisa de 15 Pulgadas	90
Figura 62. Molde de la camisa durante el proceso	91
Figura 63. Grafica de Temperatura vs Tiempo	92
Figura 64. Componentes del análisis de calor estable	93
Figura 65. Detalles del mallado para el análisis de transferencia de calor.....	93
Figura 66. Proceso de mallado del molde	94
Figura 67. Determinación de condiciones para el análisis térmico	94
Figura 68. Resultados del análisis de flujo de calor.....	95
Figura 69. Producto final, entregado por la Centrifuga	97
Figura 70. Post-proceso del producto final de la fundición	97
Figura 71. Acabo final de las camisas de hierro gris	98

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades Físicas del Hierro Gris	37
Tabla 2. Especificaciones técnicas de las Camisas de Hierro Gris (1m de longitud) .	37
Tabla 3. Punto de Fusión de algunas materiales de fundición.....	38
Tabla 4. Determinación de la recomendación de la fundición centrifuga vertical	42
Tabla 5. Lista de coeficientes de fricción para cada material.....	44
Tabla 6. Condiciones para el Cálculo de Potencia requerida	47
Tabla 7. Datos de Placa del Motor	49
Tabla 8. Requerimientos de diseño para selección de la transmisión	49
Tabla 9. Características de la Cadena Seleccionada	53
Tabla 10. Tabla de selección de piñones SKF	54
Tabla 11. Resultados obtenidos por medio de la ecuación de Goodman	60
Tabla 12. Requerimiento para la Selección de Rodillos	66
Tabla 13. Determinación de Componentes del sistema	67
Tabla 14. Determinación del espesor del molde vs diámetro interno de la camisa en Pulgadas.....	69
Tabla 15. Resultado de la selección del espesor del molde	69
Tabla 16. Registro de Variable de Temperatura vs Tiempo.	92

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA A PRUEBA DE UN PROTOTIPO DE UN SISTEMA DE FUNDICIÓN DE HIERRO GRIS POR CENTRIFUGADO

AUTOR(ES): Jorge Pérez Royero

FACULTAD: Facultad de Ingeniería Mecánica

DIRECTOR(A): Rolando Guzmán López

RESUMEN

El presente trabajo se enfocará en el desarrollo de un diseño y posterior construcción y prueba de un Prototipo para Un Sistema de Fundición de Hierro Gris por Centrifugado Horizontal, que incluye el sistema de control para las Variables (Temperatura, Velocidad de Giro) durante el Proceso de la elaboración de Camisas Cilíndricas de espesor y diámetro uniforme. El prototipo a realizar debe ser capaz de producir una camisa de 1 metro de longitud con 15 pulgadas de diámetro y 1 pulgada de pared en un tiempo no mayor a 2 horas. En la realización del proyecto se tendrá como guía los conceptos y principios físicos de ingeniera que corresponden al diseño de elementos de máquinas y los fenómenos de transferencia de calor, revisando para ello, tanto el estado del arte de este principio de fundición, como la literatura tradicional sobre el tema. La Fabricación de Camisas cilíndricas por centrifugado implica etapas adicionales como la fusión del material en el horno, el vertimiento de la colada, el desbarbado y el maquinado final; los cuales no hacen parte de las actividades en este prototipo. El tiempo de entrega será de 4 meses.

PALABRAS CLAVES: Centrifugado, Diseño, Hierro Gris, Camisas Cilíndricas

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: DESIGN, CONSTRUCTION AND TESTING OF A PROTOTYPE SYSTEM FOR GREY CAST IRON SPIN

AUTHOR(S): Jorge Pérez Royero

FACULTY: Facultad de Ingeniería Mecánica

DIRECTOR: Rolando Guzmán López

ABSTRACT

this paper will focus on developing a design and subsequent construction and testing of a prototype for a system for gray iron castings horizontal spin, which includes the control system for variables (temperature, speed drawing) during the process the preparation of shirts cylindrical uniform thickness and diameter. The prototype performed must be able to produce a shirt 1 meter long with 15 inches in diameter and 1 inch wall in no longer than two hours. In carrying out the project will be guided by the concepts and physical principles of engineering design corresponding to the machine elements and heat transfer phenomena, checking for this, both the art of casting this principle, as literature traditional about it. Manufacture of cylindrical spin shirts involves additional steps such as melting the material in the furnace, the shedding of colada, deburring and final machining; which are not part of the activities in this prototype. Delivery time is 4 months.

KEYWORDS: Spin, Design, Grey Iron, Cylindrical Shirts

INTRODUCCION

En la actualidad la industria metalmecánica es un sector que se encuentra en expansión y es impulsado por los motores de combustión interna que se encuentran diseñados bajo el principio de los sistemas radial (cilindro-pistón), debido a la condición de desgaste y pérdida de eficiencia requieren un mantenimiento correctivo de sus partes, lo que ha llevado a un aumento en la demanda de camisas de hierro gris y materiales afines para su funcionamiento especialmente en el campo de la industria del petróleo.

En la fabricación de camisas de hierro gris es importante tener una buena calidad de grano y evitar en lo posible que la superficie contenga poros o grietas, por esta razón Es imperativo llevar un control de las variables de velocidad y temperatura para un aumentar la confiabilidad en el proceso de fabricación de camisas de hierro de gris por el método de centrifugado, teniendo en cuenta las necesidades de la industria del petróleo este proyecto se enfocó en el diseño y la construcción de un prototipo para la fabricación de camisas de hierro gris.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A nivel mundial, la práctica del encamisado de motores se aplica en Latinoamérica, donde el modelo de reparación de partes y sustitución es primordial, la creciente exploración petrolífera ha permitido que la producción aumente considerablemente generando un mantenimiento más recurrente a los equipos encargados de dicha labor. Ocasionando que a nivel de Santander se presenten demoras en la consecución de partes originales para su recambio, en vista de reducir los tiempos de mantenimiento y la dificultad de consecución de algunas partes, ya sea por su antigüedad o referencia. Se planea dar respuesta a este problema utilizando la industria nacional y/o regional, que en los años anteriores ha tenido un desarrollo tecnológico y a nivel de ingeniería bastante amplio.

Planteando como solución al problema de conseguir camisas con diámetros mayores a 10 pulgadas para evitar la instalación y adecuación de nuevos equipos compresores para las plantas de las operadoras del mercado petrolífero, consecuente a esto reduciendo los tiempos de paradas de planta y de esta forma reduciendo los costos de reparación.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Diseñar, construir y probar de un prototipo para un sistema de fundición de hierro gris por centrifugado horizontal, que incluye el sistema de control para las variables (temperatura, velocidad de giro) durante el proceso de la elaboración de camisas cilíndricas de espesor y diámetro uniforme, con el fin de satisfacer la necesidad de una empresa del sector metalmeccánico de Barrancabermeja.

3.2 Objetivos específicos

- Diseñar una estructura capaz de soportar la producción de camisas de 1 metro de longitud con 15 pulgadas de diámetro y 1 pulgada de pared.

Resultado: una estructura estáticamente estable y funcionalmente resistente

Indicador: la elaboración de la estructura se basara en los fundamentos de ingeniería necesarios para la producción en serie mediante el proceso de fundición por centrifugado de camisas en hierro gris de 1 metro de longitud con 15 pulgadas de diámetro y 1 pulgada de pared.

- Realizar el modelo computarizado del prototipo por medio de un programa de simulación para analizar condiciones de trabajo a las que será sometido el prototipo.

Resultado: análisis y valores de factor de diseño para cálculo de vida a fatiga

Indicador: la simulación evaluara la operación del prototipo en condiciones de carga generadas por la velocidad de giro cercana a 300 rpm y temperaturas cercanas a los 700°C, durante el proceso de centrifugado.

- Construir el prototipo de una centrifuga horizontal para fundición de hierro gris de acuerdo a las condiciones de operación consideradas en los anteriores objetivos.

Resultado: prototipo instalado en la empresa a conformidad

Indicador: el prototipo debe cumplir con los criterios de diseño

- Realizar pruebas funcionamiento del prototipo con una camisa de hierro gris de 15 pulgadas de diámetro con una longitud de 1 metro y espesor de 1 pulgada.
Resultado: informes de las pruebas realizadas, que conducirán a la elaboración del manual de operación para el proceso de producción
Indicador: la camisa de hierro gris elaborada en el prototipo debe ser apta para las etapas siguientes al proceso (desbarbado, maquinado)

4. MARCO TEORICO

Las bases teóricas que se abordan en este documento, son parte del análisis básico de temas necesarios para el diseño. Estos son pertenecientes al tema de mecánica de fluidos, dinámica, transferencia de calor, desarrollados a lo largo del curso de pregrado de ingeniería mecánica, en particular en los conceptos teoría de fundición, centrifugado y transmisión de potencia.

4.1 Teoría de Fundición: Moldeo por colada centrifugado.

La colada centrifuga es el proceso de hacer girar el molde mientras el metal se solidifica, utilizando así la fuerza centrífuga para forzar el metal fundido a llenar las cavidades del molde. Se obtienen mayores detalles sobre la superficie de la pieza y se obtienen mejores propiedades mecánicas como dureza y resistencia a la tensión¹.

La colada centrifuga utiliza la fuerza causada por la rotación del molde para distribuir el metal fundido en las cavidades del mismo. Las cavidades del molde de cualquier forma se colocan a una cierta distancia del eje de rotación. El metal fundido se vacía por el centro y es obligado a pasar al molde debido a la fuerza centrífuga, las propiedades de la fundición varían en función de la distancia del eje de rotación.

En la Fundición centrifuga horizontal, el molde se diseña con cavidades parciales localizadas lejos del eje de rotación de manera que la fuerza centrífuga distribuya la colada del metal entre esas cavidades².

¹ SEROPE Kalpakjian, Manufactura, ingeniería y tecnología, Edición 4,2002 .p. 286

² Ibid p. 287

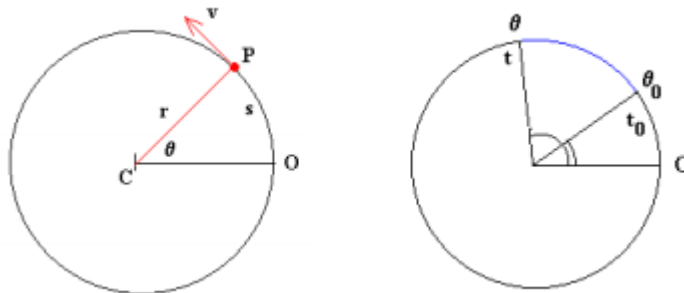
4.2 Análisis Dinámico

4.2.1 Cinemática de la rotación alrededor de un eje fijo.

La Rotación alrededor de un eje fijo es un caso especial del movimiento rotacional, la cual se explica por medio del Teorema de rotación de Euler, el cual enuncia que en un espacio tridimensional, cualquier movimiento de un sólido rígido que mantenga en un punto constante, también debe dejar constante un eje completo. Esto también quiere decir que cualquier composición de rotaciones sobre un sólido rígido con ejes arbitrarios es equivalente a una sola rotación sobre un nuevo eje.

Aplicando la cinemática se puede estudiar una partícula genérica de masa M_i , perteneciente a un disco, a una distancia r del centro del disco, y cuyas coordenadas polares vienen dadas por r_i, θ_i . La posición o coordenada angular θ , de una partícula móvil que se encuentra en el instante t en el Punto P está dada por el ángulo θ , que hace el vector CP y el origen de ángulos CO , Siendo C el centro del disco³.

Figura 1. Gráfica de Cinemática de Rotación de eje



Fuente: Autor

En el instante t la partícula móvil se encontrará en la posición P dada por el ángulo θ' . Todos los puntos que están en la recta CP tienen la misma coordenada angular θ , y Cuando la recta CP se ha desplazado $\Delta\theta = \theta' - \theta$ en el intervalo de tiempo $\Delta t =$

³ DUBBEL, Heinrich, Manual del constructor de máquinas, Edición número 5, 1977, Labor,1986.p. 17

$t'-t$, (Donde θ' es la posición angular de la recta CP en el instante t') la velocidad angular Media del cuerpo es igual al cociente entre el desplazamiento y el tiempo⁴.

4.2.2 velocidad angular instantánea

La velocidad angular instantánea se expresa en forma de módulo, es el límite del desplazamiento angular, cuando el intervalo de tiempo tiende a cero, o sea es la derivada de θ respecto al tiempo⁵.

4.2.3 Mecánica de Fluidos

Es la parte de la Física que se ocupa de la acción de los fluidos en reposo o en movimiento, así como de las aplicaciones y mecanismos de ingeniería que utilizan fluidos. La mecánica de fluidos puede subdividirse en dos campos principales: La estática de fluidos, o hidrostática, que se ocupa de fluidos en reposo, y la dinámica de fluidos, que trata de fluidos en movimiento. El término de hidrodinámica se aplica al flujo de líquidos o al flujo de los gases a baja velocidad, en el que puede considerarse que el gas es esencialmente incompresible⁶

4.2.3.1 Flujo de Fluidos

Comprende el estudio del movimiento o la circulación sin alterar sus propiedades físicas o químicas, este efecto ocurre bajo la acción de fuerzas externas. Además ciertas propiedades afectan este fenómeno como son la viscosidad.

4.2.4 Ley de newton de la viscosidad

Un fluido se diferencia de un sólido por su comportamiento cuando este se somete a un esfuerzo (fuerza por unidad de área) o fuerza aplicada. Un sólido elástico se deforma en una magnitud proporcional similar al esfuerzo aplicado. Sin embargo, cuando un fluido se somete a un esfuerzo aplicado similar continúa deformándose,

⁴ DUBBEL, Heinrich, Manual del constructor de máquinas, Edición número 5, 1977, Labor,1986.p.18

⁵ Ibid., p.18.

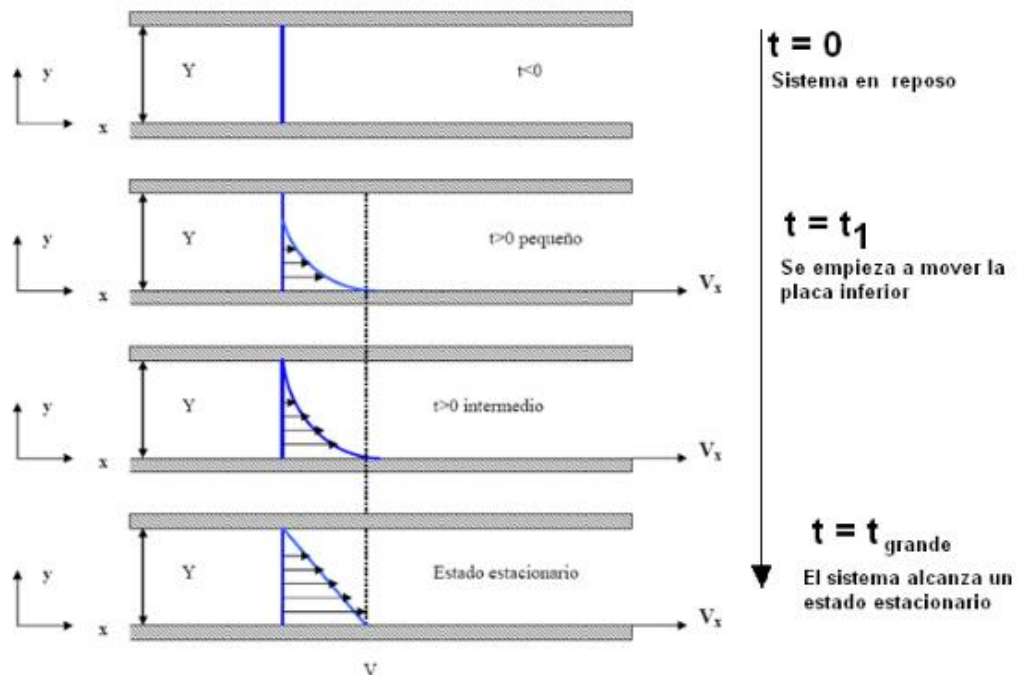
⁶ FISICANET Hidrostática Estática de fluidos [En línea] [citado 12 de Diciembre de 2014] www.fisicanet.com.ar/fisica/estatica_fluidos/ap03_hidroestatica.php

esto es, cuando fluye a una velocidad que aumenta con el esfuerzo creciente, el fluido exhibe resistencia a este esfuerzo. La viscosidad es la propiedad de un fluido que da lugar a fuerzas que se oponen al movimiento relativo de capas adyacentes en el fluido y también es el rozamiento que poseen los líquidos

4.2.5 Ley de newton de esfuerzo cortante para un fluido

El esfuerzo viscoso tiene su origen en la existencia de un gradiente de velocidad de un fluido. Cuando mayor es el valor del gradiente de velocidad mayor será el esfuerzo cortante aplicado al fluido. Existe una relación entre esfuerzo viscoso τ y el gradiente de velocidad. Newton propuso un modelo que supone que existe una relación lineal entre ambos⁷.

Figura 2. Esquema del Gradiente de Velocidad de un Fluido entre dos Placas



Fuente: DATADECA UNAD

⁷ UNIVERSIDAD PÚBLICA ABIERTA Y A DISTANCIA EN COLOMBIA, Fenómenos de transporte [En línea] [Citado: 12 de diciembre de 2014] http://datateca.unad.edu.co/contenidos/201006/Archivo_act_2.pdf

Realizando el respectivo Análisis del gráfico de Gradiente de velocidad se puede encontrar que las capas de Fluido en contacto con la placa inferior adquieren un movimiento en dirección “X” y lo propagan a las capas superiores en la dirección de “y”. Se transfiere una cantidad de movimiento de dirección “x” a la dirección “y”

La Constante de Proporcionalidad μ es la viscosidad del fluido y τ es el esfuerzo cortante aplicado al fluido. Esta ecuación es válida para el flujo laminar y no todos los fluidos la satisfacen. Aquellos que si la cumplen reciben el nombre de fluidos newtonianos⁸.

4.3 Análisis de Transferencia de Calor

4.3.1 Transferencia de Calor por conducción

La Transferencia de Calor por conducción es el tipo de intercambio de energía que se lleva a cabo usualmente entre dos sólidos. La cantidad de energía transferida, depende solo de la diferencia en temperatura entre 2 cuerpos pero también de las difusividades térmicas y las configuraciones geométricas del contacto entre dos cuerpos. La ley de Fourier establece que la cantidad de energía transferida es directamente proporcional a la diferencia de temperatura (Gradiente térmico) e inversamente proporcional a la distancia según la ecuación⁹.

Ecuación 1. Ecuación de Gradiente Térmico, Ley de Fourier

$$q = \left(\frac{K}{X}\right) (A)(\Delta T) \quad (1)$$

En donde q = Velocidad del flujo de calor, k = Conductividad térmica del material, X = el máximo espesor a través del cual viaja el calor (Medio grosor si es calentado por dos lados), A = el área transversal del material perpendicular a la dirección de la trayectoria del calor dentro del material, ΔT = La diferencia de la máxima temperatura dentro de la pieza.

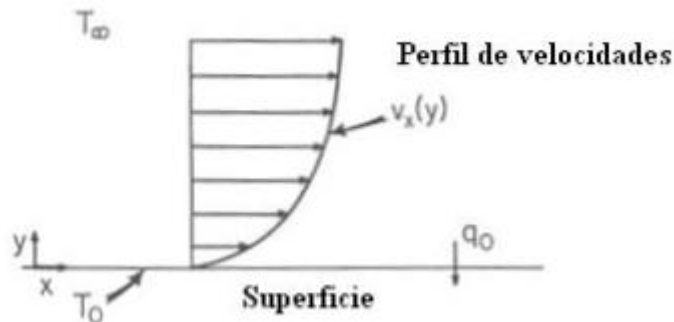
⁸ YUNUS A. Çengel, Mecánica de Fluidos, McGraw-Hill, 2008.p. 27

⁹ INCROPERA. FRANK, Fundamentos de transferencia de calor, Pearson Educación, 1999.p. 3

4.3.2 Transferencia de Calor por convección

Es el fenómeno de transferencia de calor que se presenta cuando un sólido entra en contacto con un medio circundante como el aire con una velocidad específica. Esto genera un perfil de velocidades entre la superficie del sólido y la superficie del elemento en cuestión¹⁰.

Figura 3 Transferencia de Calor por convección hacia una superficie



Fuente: Transferencia de Calor Frank P. Incropera

Para los cálculos de esta situación se debe definir una velocidad y el tipo de convección, las propiedades térmicas del fluido y la geometría de la superficie del sólido.

4.4 Fundición

Es el proceso de producción de piezas metálicas a través del vertido de metal fundido sobre un molde hueco, por lo general hecho de arena. El principio de fundición es simple: se funde el metal, se vacía en un molde y se deja enfriar, existen todavía muchos factores y variables que se deben considerar para lograr una operación exitosa de fundición. La fundición es un antiguo arte que todavía se emplea en la actualidad, aunque ha sido sustituido en cierta medida por otros métodos como el fundido a presión (método para producir piezas fundidas de metal no ferroso, en el que el metal fundido se inyecta a presión en un molde o troquel de

¹⁰Ibid., p.8

acero), la forja (proceso de deformación en el cual se comprime el material de trabajo entre dos dados usando impacto o presión para formar la parte), la extrusión (es un proceso de formado por compresión en el cual el metal de trabajo es forzado a fluir a través de la abertura de un dado para darle forma a su sección transversal), el mecanizado y el laminado (es un proceso de deformación en el cual el espesor del material de trabajo se reduce mediante fuerzas de compresión ejercidas por dos rodillos opuestos).

4.4.1 Solidificación

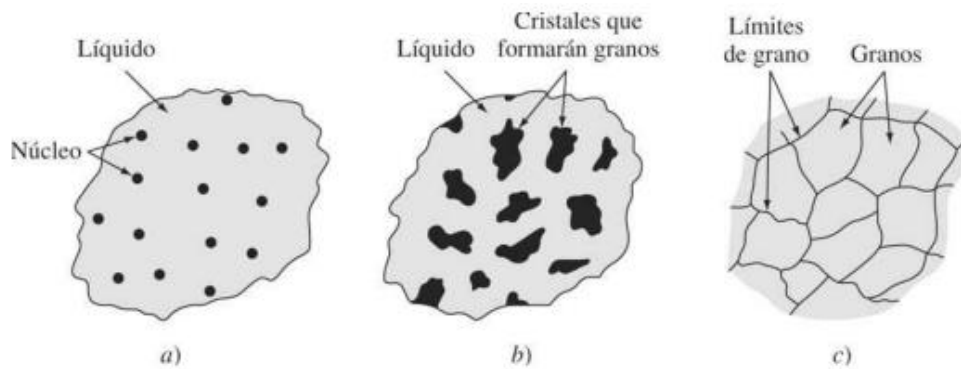
Es el proceso desde el estado fundido (líquido) a un estado sólido. Es una parte importante en el Proceso industrial debido a que muchos metales se funden para darles una geometría específica, llegando a una forma terminada o semi-terminada. ¹¹ Dicho proceso comprende unas etapas, descritas a continuación

4.4.2 Efectos Estructurales

Los efectos estructurales se presentan cuando un Material comienza la fase de solidificación, una cantidad de cristales comienzan a crecer en el líquido. El momento en que un cristal aparece se le conoce como nucleación y donde este ocurre es el punto de nucleación. A la temperatura de solidificación, los átomos del líquido, comienzan a adherirse entre sí y los puntos de nucleación comienzan a formar cristales. Las medidas finales de los cristales individuales dependen del número de los puntos de nucleación. Los cristales incrementan su tamaño por una adición progresiva de átomos y crecen¹¹.

¹¹ SMIFH, William, Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales, McGraw-Hill, 2006, p.125

Figura 4. Ilustración esquemática de la Solidificación



Fuente: Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales Página 126

4.4.2.1 Etapas de la Solidificación: Nucleación

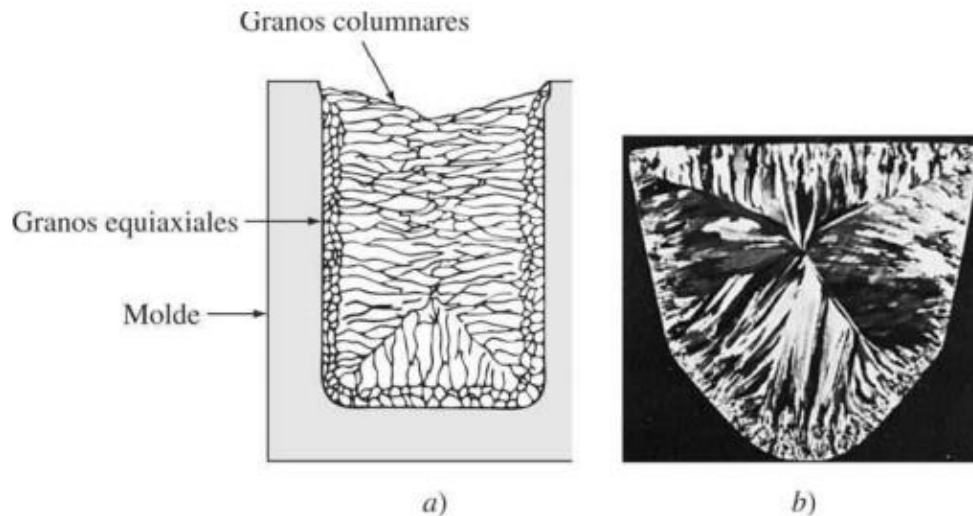
La nucleación es la primera etapa de un cambio de fase, donde se generan pequeñas superficies de una fase distinta a la existente, llamadas núcleos. Estos núcleos crecen hasta alcanzar un tamaño crítico. El cambio de fase que se produce durante el proceso puede ser la formación de un cristal a partir de un líquido.¹²

4.4.2.2 Efectos Estructurales: Crecimiento

La etapa de crecimiento se presenta desde el momento que los cristales empiezan a formar una estructura granular estable, definida por límites y fronteras propiamente¹³

¹² Ibid., p.126.

Figura 5. Esquemático de Tipos de Granos presentes



Fuente: "Metals Handbook", vol. 8, 8a. Ed., American Society for Metals, 1973, p. 164.

4.4.3 Fundiciones de hierro

Las fundiciones de hierro son aleaciones de hierro carbono con un porcentaje del 2 al 5%, las cantidades de silicio son aproximadamente del 2 al 4%, y con un contenido de manganeso hasta del 1%, bajo azufre y bajo fósforo. Se caracterizan por que se puede vaciar del horno en un cubilote para obtener piezas de diferentes tamaños y complejidad de geometrías pero las piezas resultantes no pueden ser sometidas a deformación plástica, debido a que no son dúctiles ni maleables además son poco soldables, pero sí maquinables, en cuestión de utilidad las fundiciones de hierro son relativamente duras, resistentes a la corrosión y al desgaste.

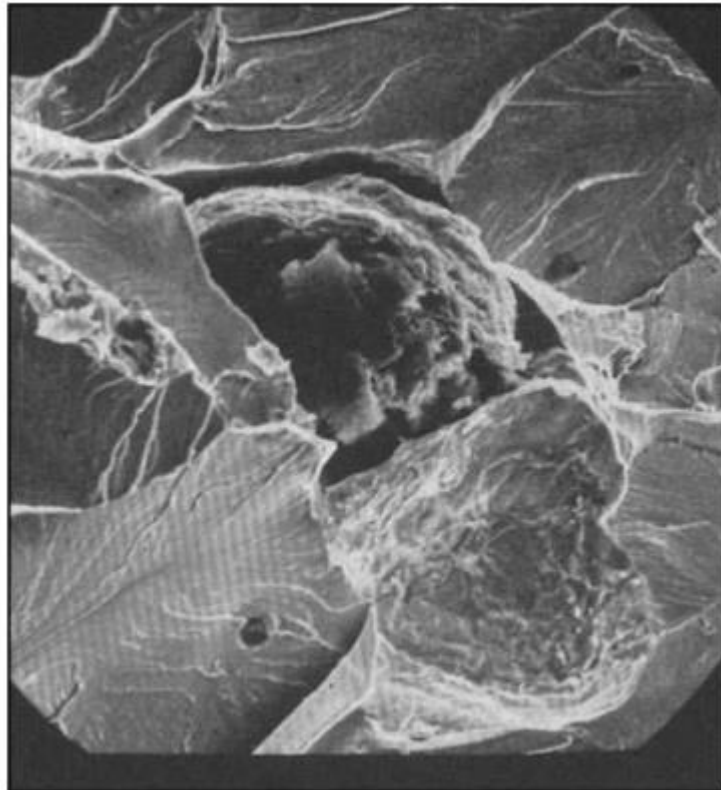
Las fundiciones tienen innumerables usos y sus ventajas más importantes son:

- Proceso de maquinado es más eficiente que los aceros.
- Se pueden fabricar piezas de diferente tamaño y complejidad.
- En su fabricación no se necesitan equipos ni hornos muy costosos.

- Absorben las vibraciones mecánicas y actúan como auto lubricantes.
- Son resistentes al choque térmico, a la corrosión y poseen una buena resistencia al desgaste.

De acuerdo con la apariencia de su fractura, las fundiciones pueden ser grises, blancas, atruchadas, aunque también existen las fundiciones maleables, nodulares y especiales o Aleadas¹³.

Figura 6. Fractura Presente en una Fundición de Hierro Dúctil



Fuente: W. L. Bradley, Texas A&M University, ASM Handbook, vol. 12, p. 237, figura 97, 1987. ASM International

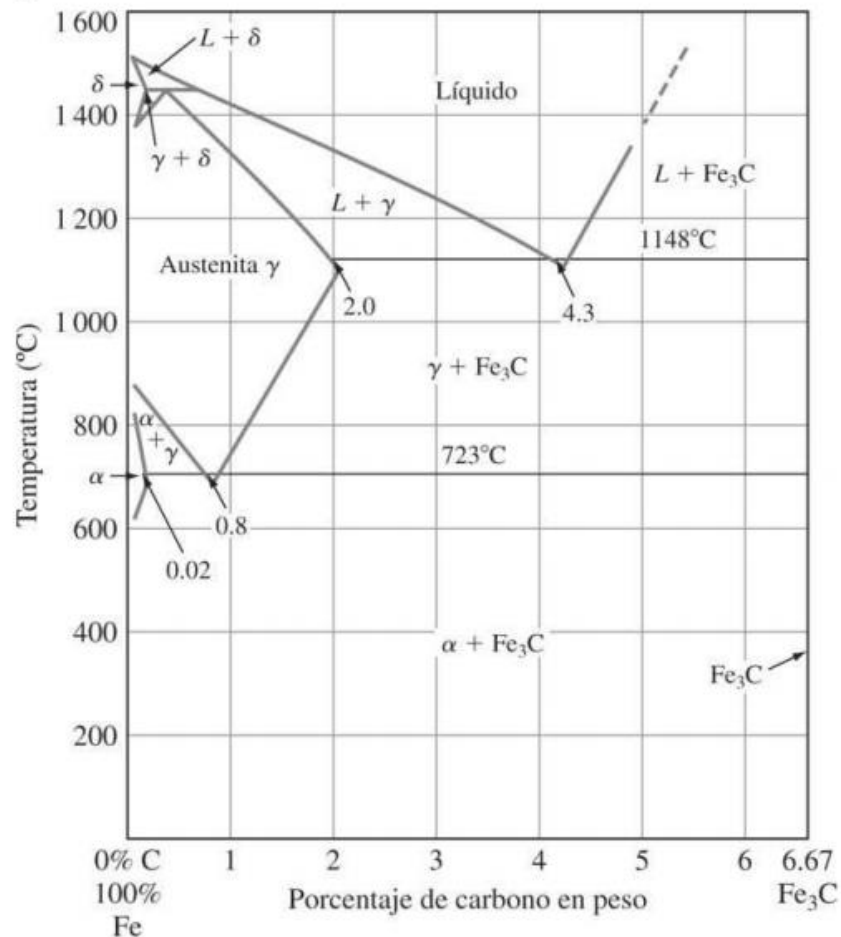
4.4.4 Microconstituyentes de las fundiciones

Las fundiciones de hierro suelen presentar los mismos constituyentes que se encuentran en los aceros, entre ellos el componente eutéctico el cual es la

¹³UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES Teoría de fundición [En línea] [Citado 13 de diciembre de 2014] http://campus.fi.uba.ar/file.php/295/Material_Complementario/Fundiciones.pdf

Ledeburita caracterizada por estar compuesta de austenita y cementita, el componente eutéctico ternario de cementita, ferrita y fosfuro de hierro (esteadita) y de carbono en forma de (láminas, nódulos o esferitas de grafito), esta microestructura se basa en el diagrama hierro carbono estable.

Figura 7. Diagrama Hierro-Carbono estable



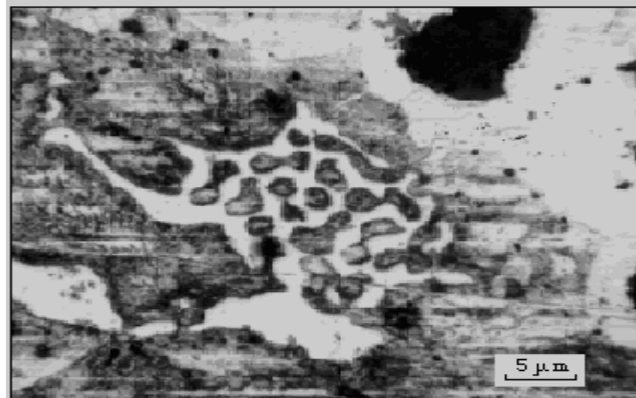
Fuente: Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales William SMIFH P. 366

4.4.4.1 Ledeburita

La Ledeburita es el constituyente eutéctico que se forma al enfriar la fundición líquida de 4.3% C desde 1145°C. Se encuentra conformada por 52% de cementita y 48% de austenita de 2% C. La Ledeburita no existe a temperatura ambiente en

las fundiciones ordinarias debido a que en el enfriamiento se transforma en cementita y perlita; sin embargo en las fundiciones se pueden distinguir las zonas donde existió la Ledeburita por el aspecto eutéctico con que quedan las agrupaciones de perlita y cementita¹⁴.

Figura 8. Rastros de Ledeburita Eutéctica 500x



Fuente: Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales William SMIFH

4.4.4.2 Esteadita

Es un constituyente de naturaleza eutéctica duro, frágil (300 a 350 Vickers) y de bajo Punto de fusión (960°C), que aparece en las fundiciones de alto contenido en fósforo (más de 0.15 % P)¹⁵.

4.4.5 Fundición Gris

La fundición gris tiene la mayor parte del contenido de carbono en el hierro gris que se da en forma de escamas o láminas de grafito, las cuales dan al hierro su color y sus propiedades deseables

El hierro gris es fácil de maquinar, tiene alta capacidad de templado y buena fluidez para el colado, pero es quebradizo y de baja resistencia a la tracción.

¹⁴ SMIFH, William, Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales, McGraw-Hill, 2006, p.202

¹⁵ Ibid., p.203

El hierro gris se utiliza bastante en aplicaciones como bases o pedestales para máquinas, herramientas, bastidores para maquinaria pesada, y bloques de cilindros para motores de vehículos, discos de frenos, herramientas agrícolas entre otras

Figura 9. Clasificación de las fundiciones grises según la norma ASTM A48-41

Clase	Resistencia a la tracción-(psi)	Dureza Brinell	Estructura
20	24000	130-180	F,P
30	34000	170-210	F,P,G
40	44000	210-260	P,G
50	54000	240-280	P,G
60	64000	260-300	B,G

Clasificación de las fundiciones grises según la norma ASTM A48-41.

F: ferrita; P: perlita; G: grafito; B: bainita

Fuente: Universidad de Buenos Aires, Estudios Aplicados de Metalografía

4.4.5.1 Fluidez

La fluidez como una propiedad de los fluidos les otorga la posibilidad deformarse continuamente bajo la acción de una fuerza tangente al plano de aplicación por pequeña que sea¹⁶. Pero en los metales esta propiedad hace referencia a la posibilidad de un metal líquido de recorrer y de llenar bien los moldes: en igualdad de Temperatura, la fundición fosforosa es la más fluida que la fundición con poco fósforo.

4.4.5.2 Contracción

El efecto de contracción se presenta cuando el metal concluye su fase de solidificación, sufre una contracción: en la fundición blanca la contracción es casi igual a la del acero (16 a 18 por 1000). En las fundiciones grises, al momento de la solidificación se agregan laminillas de grafito de peso específico

¹⁶ UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS Mecánica de Fluidos [En línea] [Citado 13 de diciembre de 2014]
http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/actualidad/a%C3%B1o2_n15_2002/mecanica_fluidos.htm

(1- 2) lo que resulta en un aumento de volumen de la masa, la contracción final resulta menor (10 por 1000); la contracción varía también según los obstáculos mayores o menores que encuentra la Colada en el molde¹⁷.

4.4.5.3 Resistencia a la tracción

Se denomina tracción al esfuerzo interno a que está sometido un cuerpo por la aplicación de dos fuerzas que actúan en sentido opuesto, y tienden a estirarlo

La fundición gris tiene una carga de rotura a la tracción que, de cerca de 15 Kg/mm², llega a los 30, 40 y 45 Kg/ mm². Las fundiciones aleadas y las esferoidales sobrepasan este límite llegando a cargas que se pueden comparar a las de los aceros de calidad (70 y hasta 80 Kg/ mm².) en las fundiciones maleables las cargas de rotura son de por lo menos 32 Kg/ mm², generalmente en torno a 40 Kg/ mm².

La resistencia a la compresión es mayor, y para las fundiciones grises normales resulta cerca de tres veces la de la tracción: por eso, como vemos, es aconsejable someter las piezas de fundición a esfuerzos de compresión, más bien que a los de tracción¹⁸.

¹⁷ Ibid., p.227

¹⁸ SHIGLEY, Joseph Edward , Diseño en ingeniería mecánica, 8 Edición, McGraw-Hill, 1997.p.102

Figura 10. Ensayo de Tracción



Fuente: INSTRON

4.4.5.4 Resistencia a la flexión

Se denomina flexión al tipo de deformación que presenta en un elemento estructural alargado en una dirección perpendicular a su eje longitudinal. Debido que en la flexión las fibras del elemento quedan tensas en la parte convexa, y comprimidas en la cóncava, la resistencia a la flexión varía según la orientación de la sección¹⁹.

4.4.5.5 Resistencia al choque

La resistencia al impacto describe la capacidad del material a absorber golpes y energía sin romperse. La tenacidad del material depende de la temperatura y la forma, el choque y la resiliencia son situaciones dinámicas, y cuando se analizan en el campo de la fundición se comportan de un modo particular. Las fundiciones grises, no resisten muy bien los choques y son frágiles debido a que no soportan la deformación plástica. Las fundiciones maleables, por el contrario, y las de grafito nodular (fundiciones dúctiles) resisten muy bien estos dos factores; no obstante, si los choques están contenidos en el límite de seguridad;

¹⁹ SHIGLEY, Joseph Edward, Diseño en ingeniería mecánica, 8 Edición, McGraw-Hill, 1997, p.55

las fundiciones grises tienen un óptimo comportamiento, por su propiedad característica de amortiguar las vibraciones, por esto (además de por razones económicas) se ha llegado a sustituir los cigüeñales de acero tratado para compresores y para motores de combustión interna, por árboles colados de fundición de hierro gris, obteniéndose un funcionamiento más regular, más suave y menos ruidoso²⁰.

Figura 11. Eje de Levas en fundición de hierro gris



Fuente: Catalogo de partes Peugeot 405

4.4.5.6 Dureza

La dureza es una Propiedad que expresa el grado de deformación permanente que sufre un metal bajo la acción directa de una carga determinada²¹

La dureza de la fundición es relativamente elevada. La fundición gris tiene una dureza de 140 a 250 Brinell, se puede mecanizar fácilmente, porque la viruta se desprende mejor y por la presencia de grafito liberado, que lubrica el paso de la viruta sobre el corte de la herramienta, la Viruta es siempre escamosa, excepto en las fundiciones maleables y en las de grafito nodular. Las fundiciones blancas tienen una dureza superior a 350 a 400 Brinell. Hasta cerca de 550 Brinell

²⁰ SHIGLEY, Joseph Edward , Diseño en ingeniería mecánica, 8 Edición, McGraw-Hill, 1997, p.57

²¹ UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA Propiedades de los materiales [En línea] [citado 13 de diciembre de 2014] <http://www.utp.edu.co/~publio17/propiedades.htm>

se pueden mecanizar con herramientas de carburo; más allá, requieren la muela de esmeril²².

Figura 12. Camisas de Hierro gris terminas



Fuente: Autor

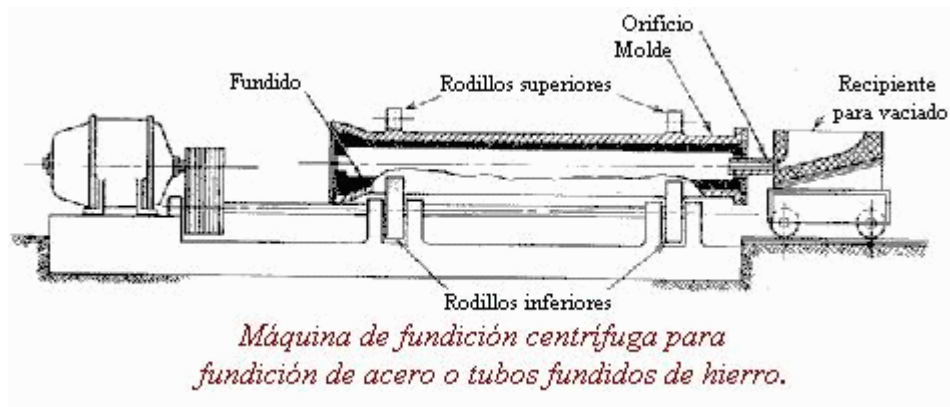
4.4.5.7 Fundición centrífuga real

En la fundición centrífuga real, el metal fundido se vacía en un molde que está girando para producir una parte tubular. Ejemplos de partes hechas por este proceso incluyen tubos, caños, manguitos y anillos. El metal fundido se vacía en el extremo de un molde rotatorio horizontal. La rotación del molde empieza en algunos casos después del vaciado. La alta velocidad genera fuerzas centrífugas que impulsan al metal a tomar la forma de la cavidad del molde; por tanto, la forma exterior de la fundición puede ser redonda, octagonal, hexagonal o cualquier otra²³.

²² SMIFH, William, Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales, McGraw-Hill, 2006, p.207

²³ CENTRIFUGAL CASTINGS, INC Fundición centrífuga Documentos, [En línea] [Citado 14 de diciembre de 2014] www.centrifugal.net

Figura 13. Máquina de Fundición centrífuga real



Fuente: Manual de Procesos, Fundición

5. DISEÑO DEL SISTEMA DE FUNDICION CENTRÍFUGO

El diseño del sistema de fundición por el método de centrifugado, surge como una respuesta a la necesidad de producción de camisas de hierro gris con un estándar de calidad en el acabado superficial y de grano, debido a que por los métodos tradicionales (Fundición en Arena, Fundición por Secciones) presentan una gran cantidad de variables que pueden afectar el acabado final y estructural que además no pueden ser objeto de control, debido a que en los tipos de fundición enunciados anteriormente el molde siempre se encuentra fuera del contacto del operador del proceso. Ocasionando un resultado al azar, con la aplicación del diseño de un sistema de fundición por el método de centrifugado, se pueden controlar las variables desde el inicio hasta el final del proceso, asegurando un producto apto para las posteriores fases de desbarbado y maquinado.

Con el fin de mejorar la calidad del producto final, se tiene en cuenta un análisis intensivo de las variables de velocidad, temperatura durante el proceso y parámetros de diseño estructural estático, debido a las dimensiones que se tienen para para el producto final.

La aplicación de la fundición centrífuga es la solución para moldes con figuras simétricas (cilindros, anillos, cojinetes... etc.), en su mayoría geometrías simples que se obtienen mediante vertimiento de material a temperaturas por encima de su punto de fusión en un molde que rota sobre su propio eje.

Enfatizando el contenido de la aplicación de la fundición centrífuga, la meta de este diseño es solucionar el requerimiento de camisas semi-terminadas de 15 pulgadas de diámetro externo

5.1 Parámetros de diseño

A continuación se presentan las variables de diseño que se pretendieron analizar durante el proceso de fabricación y construcción del prototipo para la obtención de camisas de hierro gris mediante el método de centrifugado.

5.1.2 Velocidad de rotación del molde

La velocidad de rotación del molde, es un parámetro que debe tener en cuenta para el proceso de generación del producto final, debido a que afecta las variables que depende de ella, tal como es la temperatura que define el tiempo, el valor de esta variable se debe determinar en el molde, debido a que intervienen variables tales como son el diámetro de la camisa, que afecta directamente el peso del molde (ver tabla 2), las propiedades del material del molde(ver tabla 1) y el diseño del sistema de transmisión se deben realizar para elevadas temperaturas y a la carga que se efectúa sobre el sistema, requiere una velocidad específica rotación para las condiciones de expansión del material, de acuerdo a las recomendaciones de la

Asociación de Fundidores Americanos²⁴ (Diámetros de molde entre 10" -15" @ 600-800 rpm).

Tabla 1. Propiedades Físicas del Hierro Gris

Propiedad del Material	Magnitud
Densidad	7200kg/m ³
Dureza Brinell	183 - 234
Resistencia Ultima	276 MPa

Fuente: www.matweb.com

Tabla 2. Especificaciones técnicas de las Camisas de Hierro Gris (1m de longitud)

Dimensión de Camisa (Pulgadas)	Espesor según AFS (Pulgadas)	Peso Aproximado (Kilogramos)
8	1,89	168,5
11,5	1,99	276,2
13	2,03	325,0
15	2,08	392,2
20	2,22	576,0
26,5	2,40	844,0

Fuente: AFS (Asociación Americana de Fundición)

5.1.3 Temperatura durante el proceso de Fundición

La temperatura del molde es una variable de constante cambio que se debe mantener en constante vigilancia durante el espacio de tiempo del proceso de fundición, debido a que puede ocasionar daños en la geometría de la pieza fundida y deformación durante el proceso de extracción final debido a la expansión térmica que procede a la operación de fundición además de la contracción natural del

²⁴ Anchor Bronze & Metals specializes Conclusiones de la Fundición Centrifuga, [En línea] [Citado 14 de diciembre de 2014] www.anchorbronze.com/centrifugalcast.htm

material durante el enfriamiento del mismo. Los valores de temperatura llegan hasta el punto de fusión del material, pero desde el preciso momento que el material abandona el horno, empiezan a descender drásticamente. (Ver tabla 3)

Tabla 3. Punto de Fusión de algunas materiales de fundición

Material	Temperatura de Fusión (°C)
Acero al carbono	1.516
Acero inoxidable	1.427
Aluminio	660
Bronce (Aluminio)	982
Hierro Gris	1.350 - 1.400

Fuente: www.matweb.com

5.1.4 Dimensionamiento Estructural

El dimensionamiento estructural, tiene un papel importante debido a que debemos considerar algunos factores importantes como lo es la carga de diseño calculada a partir de las propiedades intensivas como lo es la densidad del hierro gris de fundición y la geometría del molde, dependiendo del diámetro de la camisa de hierro gris la carga es de 400- 500kg (Ver tabla 2), según el objetivo de este proyecto, el interés es diseñar el sistema para camisas de hierro gris con un diámetro de 15". Pero debido a un posible requerimiento futuro, se tomara como carga de diseño el peso de la camisa de 26,5"

Para realizar el dimensionamiento estructural del sistema de fundición se tabulan los diámetros y espesores de camisas de hierro gris utilizados en la industria, que permitirá un cálculo preliminar de la carga que será sometida la estructura bajo carga estática (ver tabla2).

Figura 14. Isométrico de la Camisa de 26,5"



Fuente: Solidworks

5.1.5 Tiempo de Fundición

El tiempo de fundición es una variable crítica debido a que representa la vida útil de la máquina y la calidad final de la pieza, este tiempo empieza a correr justo en el instante que el material sale del horno a una temperatura de fusión y es vertido en el molde, por medio de aproximaciones matemáticas, se puede estimar un valor para este intervalo de tiempo, pero las condiciones ambientales y de trabajo juegan un papel, que convierte a este valor en una estimación visual o empírica

5.2 Diseño y selección de los elementos del Sistema de Fundición

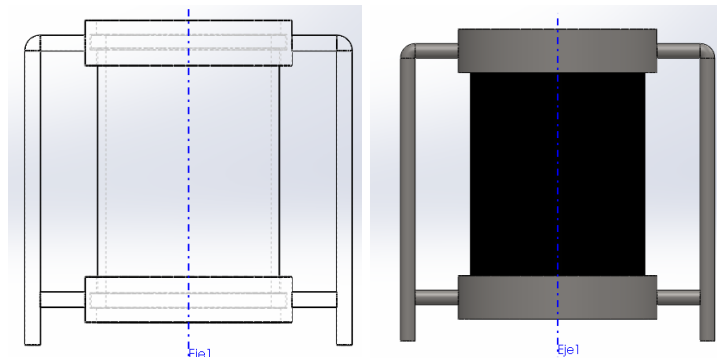
El diseño del sistema de fundición centrífugo, requiere la variación de la velocidad de rotación del molde, por lo que se requiere realizar una selección de un sistema

de transmisión que se ajuste y que permita la regulación de la velocidad de molde para evitar problemáticas como; falta de adherencia del metal líquido al molde y los posibles efectos negativos durante el proceso de fundición asociados a la velocidad de rotación.

5.2.1 Diseño Preliminar del Sistema de fundición

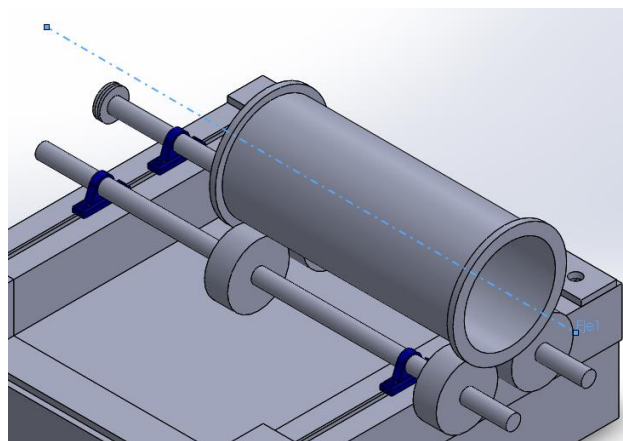
Para la realización de los cálculos, el diseño preliminar requiere un sistema de soporte para el molde y que se adapte a las condiciones de trabajo, para ellos se tuvieron en consideración algunos diseños y configuraciones presentes en la industria.

Figura 15. Opción 1: Centrifuga Vertical



Fuente: Autor

Figura 16. Opción 2: Centrifuga Horizontal



Fuente: Autor

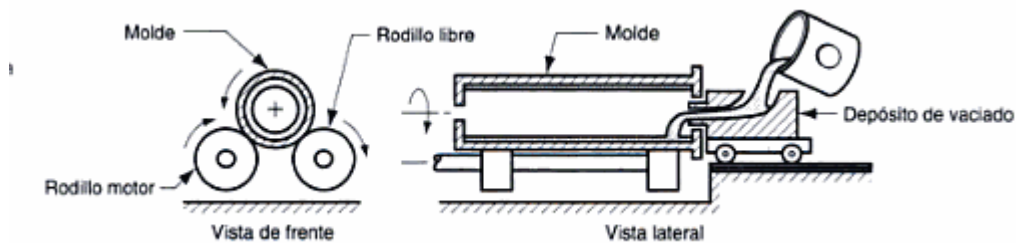
5.2.2 Caracterización y selección del sistema de fundición

Luego de tener un diseño preliminar de los dos sistemas, procedemos a analizar las características que nos ofrece cada uno de los sistemas de fundición.

5.2.2.1 Sistema de Fundición Centrifugo horizontal

La orientación del eje de rotación define el tipo de fundición a aplicar, para este caso el eje se encuentra paralelo al eje de tierra. Lo que permite que la fuerza centrífuga distribuya el metal líquido de forma distribuida por el área de interés.

Figura 17. Descripción del Centrifugado horizontal



Fuente: Fundamentos de Manufactura Moderna: Materiales, Procesos Y Sistemas Mikell P. Groover p.278

Teniendo en cuenta el análisis de la velocidad de rotación, para un sistema de fundición centrifugo horizontal, la ecuación se expresa de la siguiente manera.

Ecuación 2. Expresión de la velocidad de rotacional, Para un Sistema Horizontal

$$N = \frac{30}{\pi} * \sqrt{\frac{2g*GF}{D}} \quad (2)$$

D = Diámetro

g = Fuerza de gravedad

G = Factor G²⁵

N= Velocidad rotacional (rev/min)

²⁵ Para una fundición centrifuga este valor se encuentra en el rango de 60 a 80GS

5.2.2.2 Sistema de Fundición Centrifugo Vertical

La orientación del eje en un sistema de fundición vertical se encuentra perpendicular al eje de tierra, los resultados con respecto a la fundición horizontal son mejores en relación a la compactación del material, pero se en este tipo de fundición se presentan algunos inconvenientes con el acabo superficial interno, debido a que la fuerza de gravedad actúa sobre el metal líquido, causando que la pared de fundición sea más gruesa en la base que en la parte superior.

Realizando el respectivo análisis de la ecuación de la velocidad rotacional para un sistema vertical, se puede expresar de la siguiente manera.

Ecuación 3. Expresión de la velocidad rotacional para un sistema vertical

$$N = \frac{30}{\pi} * \sqrt{\frac{2g*L}{R_i^2 - R_b^2}} \quad (3)$$

R_i =Radio interno en la parte superior de la fundición

R_b = Radio interno en el fondo de la fundición

L = Longitud

Luego de analizar la ecuación, se presenta el inconveniente de despejar R_i y R_b lo que desencadena, que al igualarlos, la velocidad de rotación tendería al infinito, lo cual en condiciones mecánicas es imposible de conseguir, porque para la fundición centrifuga vertical se recomienda que la longitud del molde no exceda el doble del diámetro.

Para nuestro caso, la recomendación descarta la posibilidad de la aplicación de la fundición vertical. Pero sin embargo procederá a analizar en cual de nuestros modelos el método de conformado vertical es una opción de fabricación

Tabla 4. Determinación de la recomendación de la fundición centrifuga vertical

Dimensión de Camisa (Pulgadas)	Largo (Pulgadas)	Largo / Diámetro de la Camisa
8	39,37	4,9

11,5	39,37	3,4
13	39,37	3,0
15	39,37	2,6
20	39,37	2,0
26,5	39,37	1,5

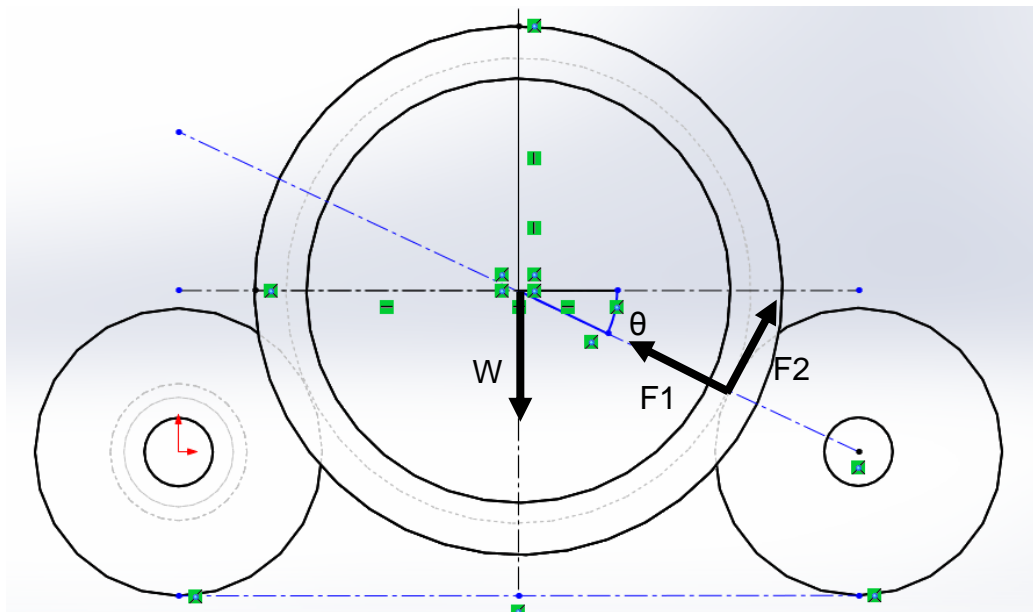
Fuente: Autor

Teniendo en cuenta la recomendación solo uno de nuestros ítems, se podría fabricar por medio de la fundición centrífuga vertical.

Luego de realizar la elección del sistema de fundición centrífugo horizontal procederemos a desarrollar el diseño.

5.2.3 Análisis de Cargas presentes en el sistema

Figura 18. Análisis de Carga que Intervienen en el Sistema



Fuente: Autor

Analíticamente, por medio de un DLC (diagrama de cuerpo libre) podemos determinar 3 fuerzas que intervienen en el área de contacto, pero para poder

conocer los valores debemos determinar el diámetro de la camisa y un coeficiente de fricción para el contacto de metal con metal.

Tabla 5. Lista de coeficientes de fricción para cada material

Materiales	Coeficiente de fricción estática	Coeficiente de fricción cinética
Acero - Acero	0.74	0.56
Aluminio - Acero	0.61	0.47
Cobre - Acero	0.53	0.36
Latón - Acero	0.51	0.44
Cinc - Hierro colado	0.85	0.21

Fuente: Física para ciencias e ingeniería Serway 7ed

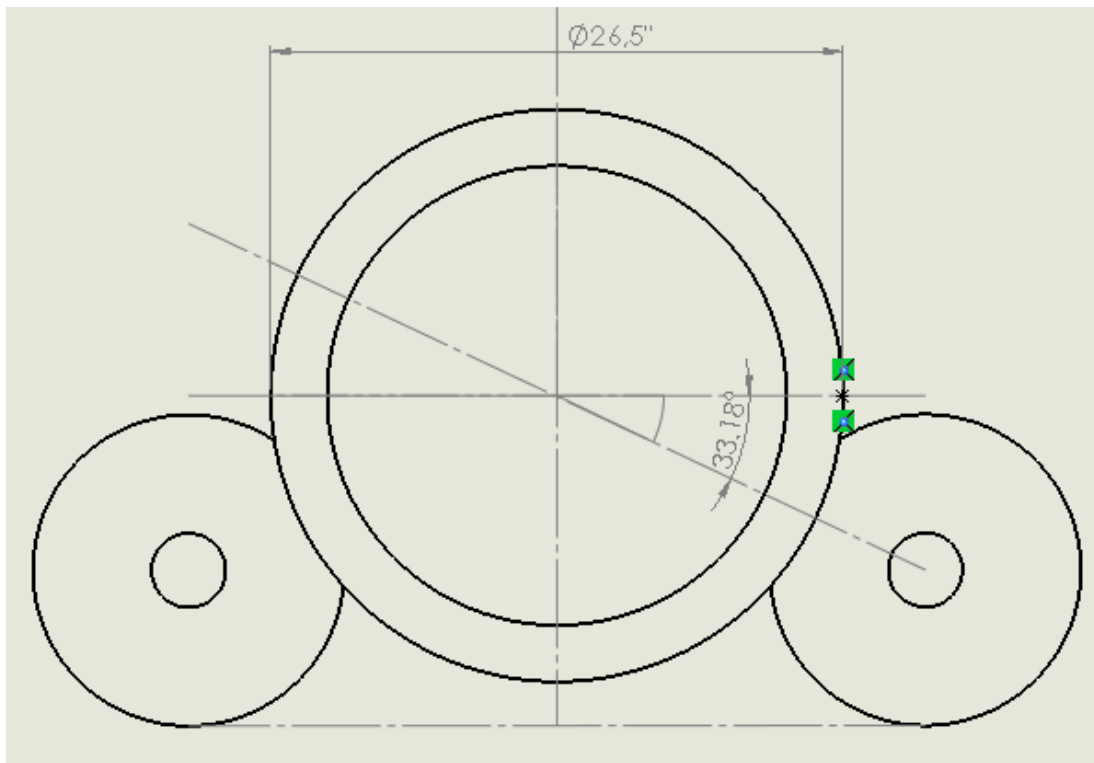
La fuerza tangencial que hay que vencer para, para permitir el giro del molde de función se representa en la figura 4, esta fuerza se expresa es función de la fuerza de contacto resultante y del coeficiente de fricción $\mu = 0,56$, valor aproximado para contacto metal-metal.

Con el fin de realizar los cálculos, se tendrá en cuenta la observación realizada en el numeral 5.1.4 Dimensionamiento estructural, en el cual se determinó que el sistema debe soportar el proceso de fundición para una camisa de 26,5”

La presente carga genera dos reacciones las cuales son F1 y F2 además de un Angulo θ , el cual se determina por la distancia de separación de los rodillos y el Angulo de cobertura que se defina para el molde.

El Angulo θ que se define para este caso se encuentra entre 30° - 40°, las dimensiones se muestran a continuación

Figura 19. Determinación de Dimensiones del sistema de fundicion



Fuente: Autor

Ecuación 4. Análisis de la Fuerza Resultante

$$\theta = 33^\circ$$

$$F1 = 211kg * \text{sen}(\theta)$$

$$Fr = F1/\mu \quad (3)$$

$$Fr = (106kg * 9,81)/0,56$$

$$F2 = 211 * \text{cos}(\theta)$$

$$F1 = 1856,89 N \quad F2 = 176,959 N$$

F = Fuerza Resultante

N = Fuerza Normal

μ = Coeficiente de Fricción entre superficies

Teniendo la fuerza resultante del sistema, procedemos a realizar el cálculo del torque que el sistema de transmisión debe transmitir para permitir la rotación del

molde. El diámetro de rodillo se tomara de un valor de 4 pulgadas, para fines del cálculo del torque, más adelante se realizara la verificación respectiva

$$T = F * \frac{d}{2}$$

$$T = 1856,89 * \left(2'' * \frac{2,54cm}{1''} * \frac{1m}{100cm} \right)$$

$$T = 94,33N * m$$

T = Torque

d = Diámetro del Rodillo

Luego de conocer el Torque necesario para permitir la rotación del molde en el sistema, procedemos a calcular la potencia requerida por el sistema

Ecuación 5. Análisis de la Potencia Necesaria

$$P = T * w$$

$$P = 94,33 \frac{N}{m} * \left(600rpm * \frac{\pi}{30} \right) \quad (4)$$

$$P = 5926,93w$$

P: potencia en W

T: torque de la máquina e Nm

W: Velocidad tangencial rad/seg

F: fuerza (peso, fricción) en N

V - velocidad en m/s

Luego de despejar las Incógnitas, podemos conocer la Potencia en KW

$$P = 5,926KW = 7,94 HP$$

Para tener un valor cercano a este motor debemos asumir unas pérdidas por las condiciones de fricción por el contacto con las cadenas y los demás elementos de transmisión de potencia

$$P_{real} = \left(\frac{7,94HP}{0,67} \right)$$

$$P_{real} = 11,16 HP$$

El valor que nos entrega los cálculos es aproximadamente de 11,16 HP

5.2.4 Cálculo del sistema de transmisión

Para el Cálculo del sistema de transmisión contamos con valores de velocidad entregados por las recomendaciones de la Asociación Americana de Fundición (AFS) la velocidad de rotación se debe encontrar entre (500-600 rpm), las dimensiones del molde de fundición (diámetro: 15 pulgadas), y los elementos de transmisión de potencia en este caso son elementos flexibles (cadenas), acoples, piñones que serán elegidos de los catálogos de los fabricantes teniendo en cuenta los cálculos de potencia requerida por el sistema y la entregada por el motor.

Tabla 6. Condiciones para el Cálculo de Potencia requerida

Variable	Magnitud
Velocidad requerida por el sistema	600 rpm
Carga	850kg

Fuente: AFS

La carga presente en la tabla es una estimación, para la realización de los cálculos. Con las condiciones de operación requeridas para realizar la operación de fundición, procedemos a realizar un análisis de la carga del sistema. Con un valor de 11,16 HP necesarios para mover el sistema, se procede a hacer la selección del motor en el catálogo, de nuestro proveedor de motores.

Tabla 7. Datos de Placa del Motor

Datos	Valor
Potencia	15 HP
Frecuencia	60 HZ
Diámetro de Eje del motor	1,5 Pulgadas
Velocidad de Salida	1500 RPM

Fuente: Autor

Para cumplir la relación de transmisión ($m \approx 2$) del sistema de fundición (motor-molde) se utilizó las siguientes requerimientos de diseño (ver tabla8). **En el siguiente apartado se presenta la selección del tipo de transmisión flexible.**

Tabla 8. Requerimientos de diseño para selección de la transmisión

Requerimiento de diseño	Magnitud
Velocidad Requerida por el sistema	600 rpm
Velocidad del eje motor	1500 rpm

Fuente: www.ecatalog.weg.net

5.2.2 Selección del tipo de transmisión

Para la transmisión de potencia, existen varias opciones que se pueden considerar válidas.

- Cadenas
- Bandas
- Piñones

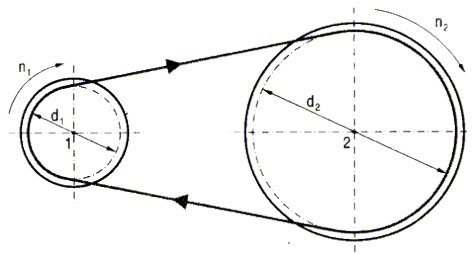
Se podría tener en cuenta la utilización de bandas para el sistema de transmisión, pero por cuestiones de transmisión de potencia, se requerirían más de dos correas para transmitir la potencia necesaria para mover el sistema y para las condiciones del sistema, el sistema de transmisión por cadenas se desempeña de una mejor manera, debido necesidad de arrastre del sistema y las temperaturas a las que se encuentra sometido

Figura 21. Sistema de Transmisión por Cadenas



Fuente: Autor

Figura 22. Determinación de los Valores del Sistema de Transmisión



Fuente: Resistencia de Materiales Aplicada Robert Mott

d_1 = Diámetro de Rueda conductora

n_1 = Velocidad de Rueda conductora

d_2 = Diámetro de Rueda conducida

n_2 = Velocidad de Rueda conducida

Ecuación 6. Relación de transmisión

$$\frac{d_1}{n_1} = \frac{d_2}{n_2} \quad (6)$$

Con el fin de comprobar la relación de transmisión necesaria para el sistema, se utilizara como el d1, el diámetro de salida del eje del motor

Luego de reemplazar los valores el diámetro de la rueda conducida es el siguiente

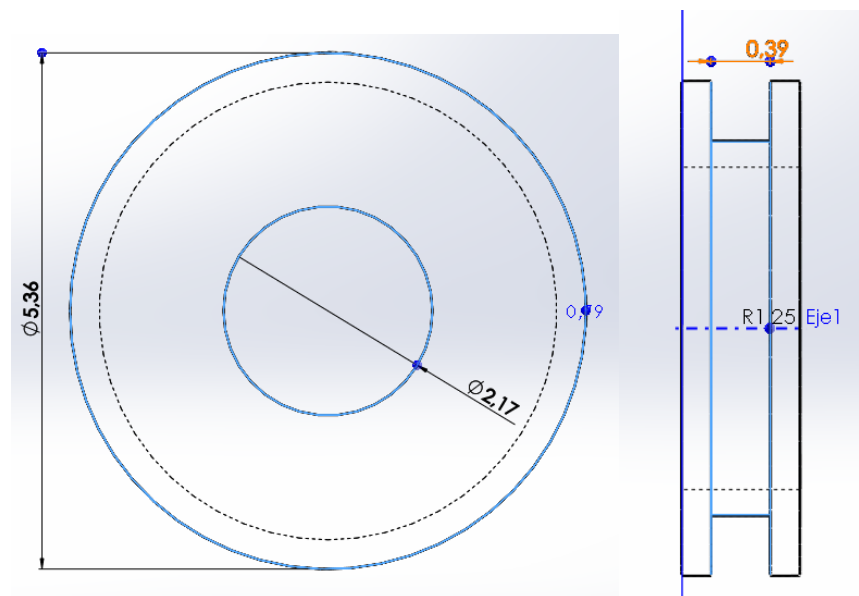
$$\frac{1,5''}{700rpm} = \frac{d2}{1500rpm}$$
$$d2 = 3,2''$$

Pero el diámetro d1 está sujeto a cambio, debido a que no podemos considerar que el diámetro del piñón 1 sea de igual que el del eje. Por lo que se considerara utilizar un nuevo diámetro, con el fin de evitar discontinuidades en la transmisión

$$d1 = 2,5''$$
$$\frac{2,5''}{700rpm} = \frac{d2}{1500rpm}$$
$$d2 = 5,36''$$

Tomando como valor este nuevo dato, tenemos un nuevo valor para la rueda conducida, el cual mantiene la relación de transmisión, anteriormente calculada

Figura 23. Rueda conducida dimensiones



Fuente: Autor

Teniendo en cuenta la relación del sistema queda 1:2 entre las poleas y el diámetro del eje del motor, luego de tener esta relación, se requiere conocer la longitud de la cadena

Ecuación 7. Cálculo de la longitud de la cadena

$$\frac{L}{P} = \frac{(z1+z2)}{2} + (z1 + z2) * \frac{B}{\pi} + O_1 + O_2 * \cos b * \frac{2}{p} \quad (7)$$

L: es la longitud total de la cadena en mm;

P: es el paso de la cadena, en mm;

z1: número de dientes del piñón;

z2: número de dientes de la rueda mayor;

O1: distancia al centro de la rueda conducida, en mm;

O2: distancia al centro de la rueda conductora, en mm;

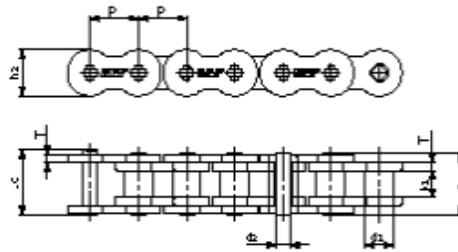
B: ángulo de contacto, en radianes

$$\text{longitud de cadena} = 98 \text{ cm}$$

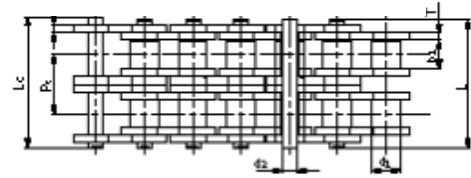
Según la Ecuación para encontrar la longitud de la cadena esta debe tener 98 cm de longitud no se encuentra en el mercado, se debe adaptar colocando un tensor o moviendo la posición de los componentes conductores y conducidos.

Para la selección utilizamos algunos datos que ya teníamos definidos como lo son los Z para los dientes del piñón conductor y conducido, con esto procedemos a realizar la selección en el catálogo de SKF

Figura 24. Catálogo de cadenas SKF serie Xtra



utilizadas para movimiento de suelos



N° Cadena	Paso	Diámetro del rodillo		Distancia entre placas interiores		Diámetro del pasador		Longitud del pasador		Altura de la placa interior	Espesor de la placa	Carga límite de rotura	Carga de rotura promedio	Peso por metro	Designación
	P	d ₁ max	b ₁ max	d ₂ max	L max	L _c max	h ₂ max	T max	Q min	Q ₂	q				
-	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	kN	kN	kg/m	-
25SH-1*	6,35	3,3	3,18	2,01	9,0	-	6,00	2,01	5,09	2,01	2,01	5,09	5,6	2,17	PHC 25SH-1X...
35SH-1*	9,525	5,08	4,77	3,58	13,3	14,3	9,00	1,50	11,00	1,50	1,50	11,00	13,6	0,41	PHC 35SH-1X...
40SH-1	12,700	7,95	7,85	3,96	18,8	19,9	12,00	2,03	22,40	2,03	2,03	22,40	24,8	0,82	PHC 40SH-1X...
50SH-1	15,875	10,16	9,40	5,08	22,1	23,4	15,09	2,42	30,40	2,42	2,42	30,40	36,2	1,25	PHC 50SH-1X...
60SH-1	19,050	11,91	12,57	5,94	29,2	31,6	18,00	3,37	44,80	3,37	3,37	44,80	54,4	1,87	PHC 60SH-1X...
80SH-1	25,400	15,88	15,75	7,92	36,2	37,7	24,00	4,00	88,20	4,00	4,00	88,20	93,0	3,10	PHC 80SH-1X...
100SH-1	31,750	19,05	18,90	9,53	43,6	46,9	30,00	4,80	116,60	4,80	4,80	116,60	129,1	4,52	PHC 100SH-1X...
120SH-1	38,100	22,23	25,22	11,10	53,5	57,5	35,70	5,60	158,20	5,60	5,60	158,20	175,3	6,60	PHC 120SH-1X...
140SH-1	44,450	25,40	25,22	12,70	57,6	62,2	41,00	6,40	206,00	6,40	6,40	206,00	266,5	8,30	PHC 140SH-1X...
160SH-1	50,800	28,58	31,55	14,27	68,2	73,0	47,80	7,20	274,00	7,20	7,20	274,00	293,0	10,30	PHC 160SH-1X...
200SH-1	63,500	39,68	37,85	19,85	86,6	93,5	60,00	9,50	506,10	9,50	9,50	506,10	562,3	19,16	PHC 200SH-1X...

N° Cadena	Paso	Diámetro del rodillo		Distancia entre placas interiores		Diámetro del pasador		Longitud del pasador		Altura de la placa interior
	P	d ₁ max	b ₁ max	d ₂ max	L max	L _c max	h ₂ max			
-	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
25SH-1*	6,35	3,3	3,18	2,01	9,0	-	6,00	2,01	5,09	2,01
35SH-1*	9,525	5,08	4,77	3,58	13,3	14,3	9,00	1,50	11,00	1,50
40SH-1	12,700	7,95	7,85	3,96	18,8	19,9	12,00	2,03	22,40	2,03
50SH-1	15,875	10,16	9,40	5,08	22,1	23,4	15,09	2,42	30,40	2,42
60SH-1	19,050	11,91	12,57	5,94	29,2	31,6	18,00	3,37	44,80	3,37
80SH-1	25,400	15,88	15,75	7,92	36,2	37,7	24,00	4,00	88,20	4,00

Fuente: Catalogo de Cadenas de Transmisión SKF p.17

La cadena que seleccionamos nos entrega el dato del paso, para proceder a seleccionar los piñones.

Tabla 9. Características de la Cadena Seleccionada

N° de Cadena	Paso
80SH-1	25,4mm

Fuente: Catalogo de Cadenas de Transmisión SKF p.17

5.2.3 Selección de Piñones para el Sistema de Transmisión

A continuación se Seleccionara los piñones requeridos para el sistema de transmisión, teniendo en cuenta los siguientes factores.

- Potencia
- Velocidad de Giro
- Carga a Transmitir
- Paso de la cadena

Se dispone de un Motor de 15 Hp que gira a 1500 rpm que según las especificaciones técnicas resulta apto para generar la potencia requerida para el sistema de fundición. Como ya conocemos la relación de las velocidades, requerimos seleccionar el tipo de piñones que puedan transmitir la potencia de 15 hp y que reduzcan la velocidad según las relaciones propuestas.

Para realizar la Elección del piñón debemos aproximarnos al diámetro que nos entregó el cálculo de la relación de transmisión el cual fue de 5,36”

Tabla 10. Tabla de selección de piñones SKF

ISO 16B-1 25,40 mm Paso

Orificio mínimo Tipo B/C – Acero/Fundición Tipo A - Acero

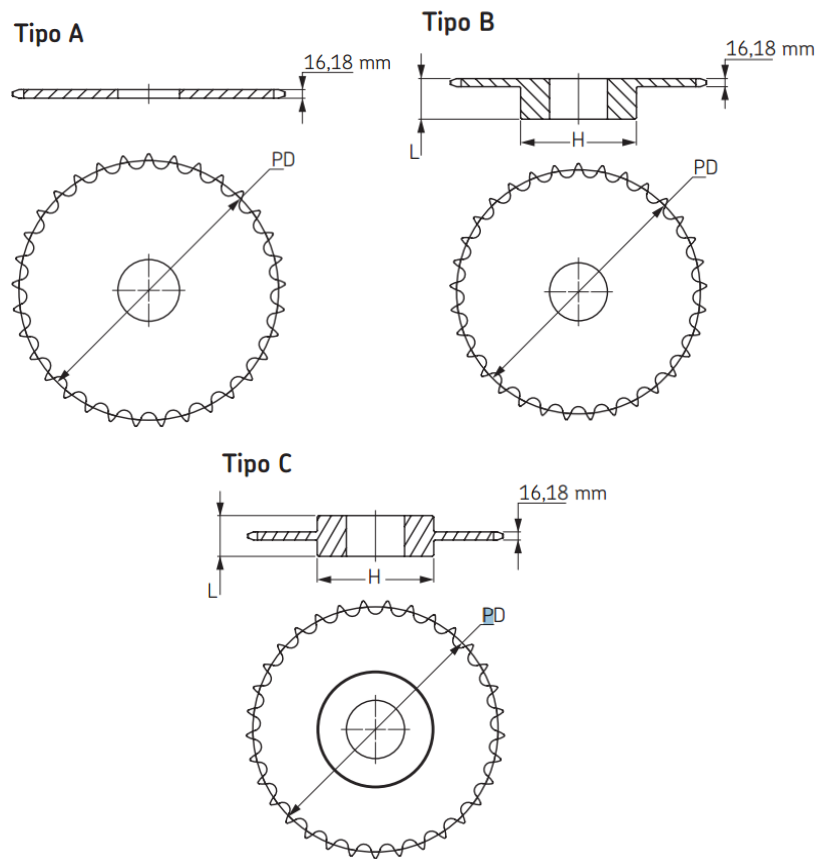
Cantidad de dientes	Diámetro primitivo mm	Tipo	Orificio		Cubo/maza		Peso kg	Designación	Cantidad de dientes	Diámetro primitivo mm	Tipo	Orificio		Peso kg	Designación
			Mín mm	Max mm	H mm	L mm						Mínimo mm	Peso kg		
8	66,37	B	16	22	42	35	0,50	PHS 16B-1B8	8	66,37	A	12	0,34	PHS 16B-1A8	
9	74,27	B	16	28	50	35	0,68	PHS 16B-1B9	9	74,27	A	12	0,44	PHS 16B-1A9	
10	82,19	B	16	34	55	35	0,87	PHS 16B-1B10	10	82,19	A	12	0,96	PHS 16B-1A10	
11	90,14	B	16	38	61	40	1,18	PHS 16B-1B11	11	90,14	A	16	0,68	PHS 16B-1A11	
12	98,14	B	16	44	69	40	1,48	PHS 16B-1B12	12	98,14	A	16	0,81	PHS 16B-1A12	
13	106,12	B	16	48	78	40	1,82	PHS 16B-1B13	13	106,12	A	16	1,00	PHS 16B-1A13	
14	114,15	B	16	53	84	40	2,14	PHS 16B-1B14	14	114,15	A	16	1,13	PHS 16B-1A14	
15	122,17	B	16	58	92	40	2,52	PHS 16B-1B15	15	122,17	A	16	1,30	PHS 16B-1A15	
16	130,20	B	20	64	100	45	3,19	PHS 16B-1B16	16	130,20	A	20	1,48	PHS 16B-1A16	
17	138,22	B	20	70	100	45	3,41	PHS 16B-1B17	17	138,22	A	20	1,68	PHS 16B-1A17	

15	122,17	B	16	58	92	40	2,52	PHS 16B-1B15
16	130,20	B	20	64	100	45	3,19	PHS 16B-1B16
17	138,22	B	20	70	100	45	3,41	PHS 16B-1B17

Fuente: Catalogo de Piñones SKF p.105

El resultado de la selección nos entrega el Piñón **PHS-16B-1B17** conducido que tiene 17 dientes, en cumpliendo al requerimiento del diámetro y seleccionando un Tipo C podemos optar por seleccionar el acero como material de fabricación el cual es recomendable para una velocidad de 1500 rpm

Figura 25. Caracterización de los Piñones



Fuente: Catalogo de Piñones SKF

El planteamiento que se desea realizar para evitar el descarrilamiento de la cadena es colocar este piñón entre dos platinas, evitando problemas futuros

5.2.4 Diseño del eje para el sistema de transmisión

Para el diseño del eje se deben tener en consideración algunos factores que se deben conocer como son.

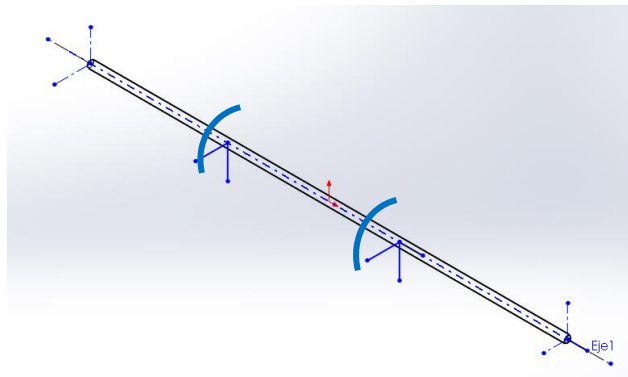
- Velocidad de Giro del eje
- Potencia o par torsional que debe transmitir el eje
- Componentes para transmitir potencia y demás elementos

Los criterios de selección del eje, se basaron en los siguientes parámetros

- Área transversal suficiente para soportar la carga
- Material resistente a la deformación
- Un módulo de elasticidad alto

5.2.4.1 Determinación de las cargas en el eje

Figura 26. Diagrama de Cargas sobre el eje



Fuente: Autor

Las cargas sobre el eje se determinan por los elementos presentes en el, en este caso.

- Dos cojinetes de soporte
- Las reacciones y momentos generados por el peso del molde sobre los puntos de soporte.

Para el diseño del eje, debemos seguir unos pasos los cuales se describen a continuación

Paso 1: Diagrama de cuerpo libre del elemento

Paso 2: Determinación del torque ejercido en el eje

Paso 3: Selección de un material que cumpla los requerimientos

Paso 4: Asumir un factor de seguridad para el diseño

Paso 5: Determinación de los factores de diseño

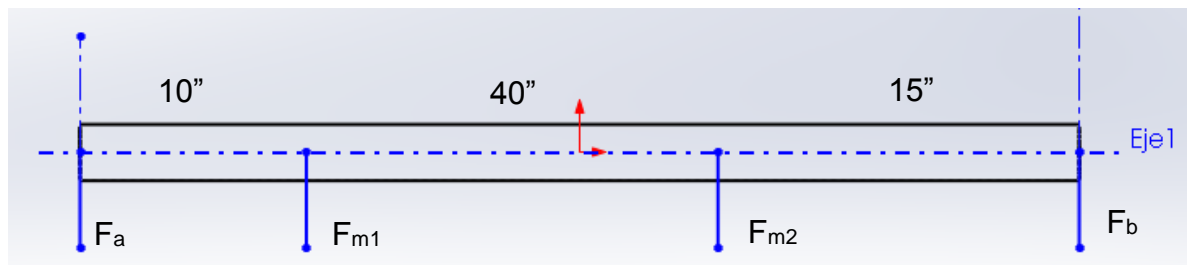
Paso 6: Calculo de diámetros

Paso 7: Estandarización de diámetros

Luego de tener los pasos, se procederá a realizar los respectivos cálculos y diagramas.

Paso 1: Diagrama de cuerpo libre

Figura 27. Diagrama de cuerpo libre



Fuente: Autor

Los valores de F_{m1} y F_{m2} se determinan por el conocimiento del peso del molde y las reacciones restantes podemos realizarlas por medio de la ecuación de momento.

El valor de A depende de la posición en la que se coloque el molde

$$\varepsilon M_o = 0$$

$$\varepsilon M_a = 0$$

$$0 = F_{m1} * A + (F_{m2} * (A + B)) - F_b(A + B + C)$$

$$F_b = \frac{(225kg * (10")) + (225 * (10" + 40"))}{(65")}$$

$$F_b = 207,6kg$$

Se estima que el valor de la reacción en el soporte F_b es aproximadamente 207,6Kg por cuestión de equilibrio la reacción en F_a se supone que es 242,4 kg

Paso 2: Determinación del momento, aplicado al sistema

$$M_{rc} = (\sqrt{M_{cyx}})^2 + (M_{czx})^2$$

$$M_{rc} = (\sqrt{202^2 + (238)^2})$$

$$M_{rc} = 3062,35 \text{ N} * \text{m}$$

Paso 3: Selección de un material que cumpla los requerimientos

Para el diseño del eje, se selección un acero 1020 de la página 597, apéndice A-13 del libro Diseño de Maquinas de Robert Mott

Las propiedades que se enuncian a continuación son valores entregados por el proveedor del material Ferrocortes S.A.S

Figura 28. Propiedades Acero 1020 Ferrocortes

Propiedades Mecánicas mínimas estimadas según SAE J1397

Tipo de proceso y acabado	Resistencia a la tracción		Límite de Fluencia		Alargamiento en 2" (%)	Reducción de área (%)	Dureza (HB)	Relación de maquinabilidad ¹²¹² EF =100%
	PSI	MPa	PSI	MPa				
Caliente y maquinado	58000	400	32000	220	25	50	116	70
Estirado en frio	64000	440	53600	370	15	40	126	

Fuente: Ferrocortes, Guía de compra

Paso 4: Asumir un Factor de Seguridad para el Diseño

El factor de seguridad tendrá un valor de 2 para darle una mayor confiabilidad de trabajo y brindar la posibilidad de aplicar para otro tipo de modelo

Paso 5: Determinación de los factores de diseño

Para este caso se asume un factor de concentración de esfuerzo K_t principalmente por que el eje que estamos diseñando se encuentra entre dos rodamientos

$$K_t = 1.5$$

Paso 6: Determinación del diámetro

Para determinar el área transversal adecuada, se utilizaron los criterios de diseño de ejes por los modelos de Soderberd y Goodman, pero debido a que requerimos un diseño un poco más robusto, Goodman es una buena elección debido a que es un método más conservador

A continuación se Analizara la condición del eje por el método de Goodman para ello debemos definir los esfuerzo a los que se encuentra sometido el eje, los cuales son torsión y flexión

Ecuación 8. Expresión general del modelo Goodman

$$\tau_{max} = \sqrt{\left(\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2\right) + \tau_{xy}} \quad (4)$$

$$\tau_{max} = \frac{16}{\pi * d^3} * \sqrt{M^2 + T^2}$$

Teoría Cortante Máximo

$$d = \left(\frac{32 * n}{\pi * S_Y} (M^2 + T^2)^{1/2}\right)^{1/3}$$

$$d = \left(\frac{32 * 2}{\pi * S_Y} (5780,1^2 + 151,19^2)^{1/2}\right)^{1/3}$$

$$\mathbf{d = 0,063502 \text{ m} = 2,5007''}$$

S_{su} = Resistencia Ultima a la Fatiga

S_{se} = Resistencia a la Fatiga

T= Torque aplicado al Sistema

M= Momento aplicado

Paso 7: Estandarización de diámetros

Aplicando el concepto de Goodman se obtuvieron los siguientes valores para el eje del sistema

Tabla 11. Resultados obtenidos por medio de la ecuación de Goodman

Dimensionamiento de Área	Tamaño del Eje
1	2,5"

Fuente: Autor

5.2.5 Validación numérica de los esfuerzos sobre eje

A Continuación se muestran datos del proceso de validación y los resultados del análisis por elementos finitos realizado en el software de simulación (Ansys versión Académica 14.5, de la Universidad Pontificia Bolivariana).el cual tiene un límite de 12000 nodos para componentes y ensamblajes

Luego de realizar el respectivo proceso de diseño, procedemos a realizar una verificación numérica, para corroborar que la selección efectuada fue la correcta.

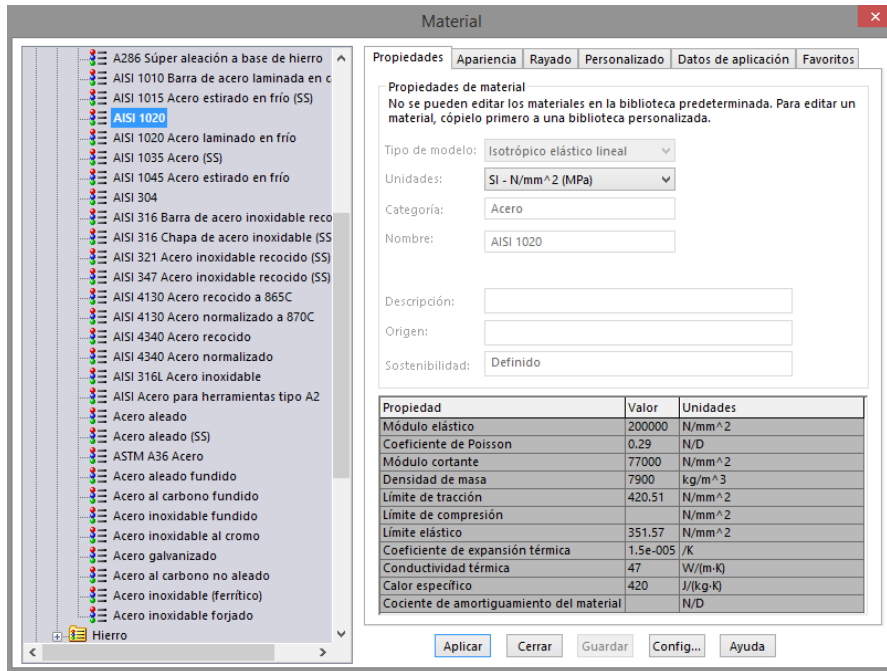
5.2.5.1 Descripción del procedimiento

Para obtener unos resultados válidos mediante el uso de los elementos finitos es fundamental tratar de reproducir de la forma más fiel posible las condiciones reales a las cuales se va a someter el sistema de fundición por lo que se definieron las siguientes condiciones de entorno y propiedades.

Asignación de materiales

El elemento a considerar en el análisis por elementos finitos es el eje que debe soportar la carga, el material que se seleccionara es el AISI 1020 como se discutió en el paso 3 del apartado 5.2.4, todo el eje se encuentra fabricado de este material.

Figura 29. Asignación de materiales al modelo por medio de Solidworks

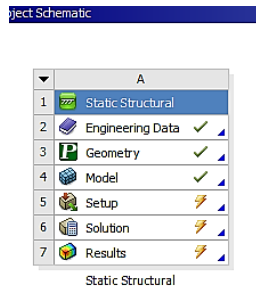


Fuente: Solidworks

Análisis de la Geometría

- Propiedades Acero 1020
- Soportes cilíndricos
- Tipo de análisis: estático estructural
- Cargas Radial y Tangencial (Según Análisis de Fuerzas, ver Figura 27)

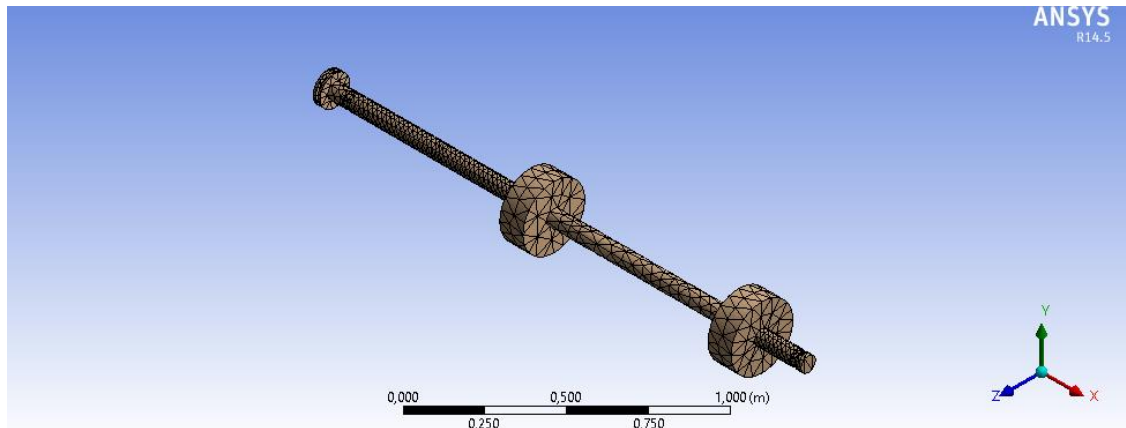
Figura 30. Ventana del Análisis de Ansys



Fuente: Ansys 14.5

ANALIS DE MALLA

Figura 31. Enmallado utilizado en la simulación del eje del sistema de transmisión



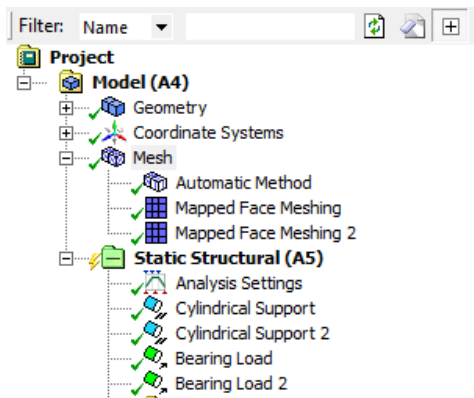
Details of "Mesh"		Details of "Mesh"	
Defaults		Advanced	
Physics Preference	Mechanical	Shape Checking	Standard Mechanical
<input type="checkbox"/> Relevance	43	Element Midside Nodes	Program Controlled
Sizing		Straight Sided Elements	No
Use Advanced Size Function	Off	Number of Retries	Default (4)
Relevance Center	Medium	Extra Retries For Assembly	Yes
<input type="checkbox"/> Element Size	Default	Rigid Body Behavior	Dimensionally Redu...
Initial Size Seed	Active Assembly	Mesh Morphing	Disabled
Smoothing	Medium	Defeaturing	
Transition	Fast	Statistics	
Span Angle Center	Coarse	<input type="checkbox"/> Nodes	7127
Minimum Edge Length	0,199490 m	<input type="checkbox"/> Elements	3616
Inflation		Mesh Metric	None
Patch Conforma Options			

Fuente: Ansys 14.5

NUMERO DE NODOS ELEMENTOS: 7,127 nodos

Para el proceso de mallado se realizaron algunas caracterizaciones con respecto a la cantidad de nodos y a la relevancia de la malla por lo que se aplicó un factor de 43, se utilizaron elementos tetraédricos en los componentes del eje y elementos triangulares en los puntos de carga con el fin de obtener valores más precisos, además se realizó un refinamiento con la herramienta de mapeado en las zonas de interés

Figura 32. Componentes del proceso de mallado



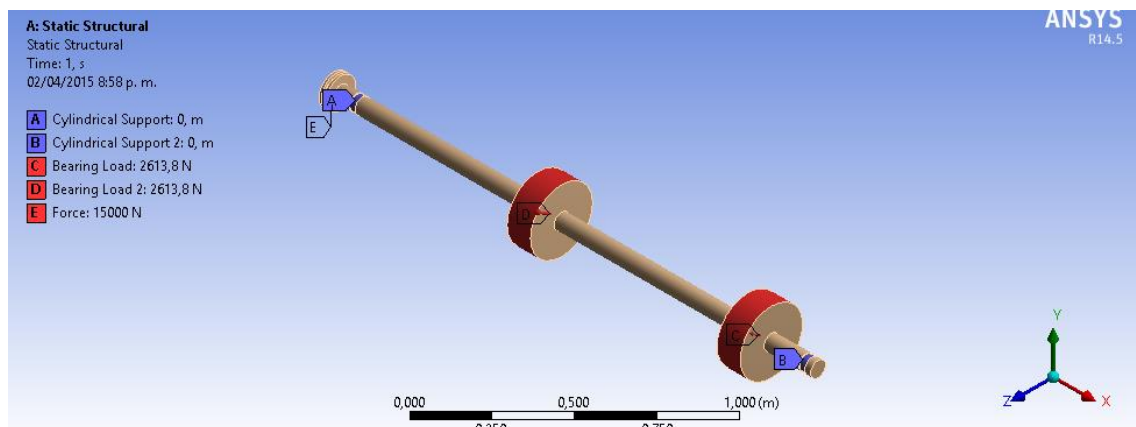
Fuente: Ansys 14.5

Definición de cargas y restricciones

Los siguientes aspectos a definir son el tipo de contacto que se produce entre los elementos del estudio y también los movimientos permitidos para cada uno de los componentes.

Para este se define contacto axial y tangencial sobre el sistema, ocasionado por la carga del molde, El contacto entre todos los elementos es de tipo puntual (Molde sobre superficie del eje), este aspecto nos lleva a una posible simplificación a la hora de modelar debido a que el software de simulación realizara los cálculos correspondientes

Figura 33. Cargas aplicadas a la simulación del eje del sistema de transmisión



Fuente: Ansys 14.5

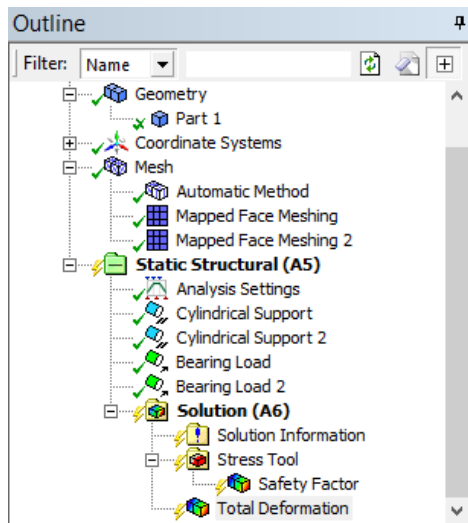
En referencia a la posición, desplazamiento y contacto de los componentes, se definen para el análisis las siguientes condiciones:

- El eje se encuentra apoyado por chumaceras, soportes cilíndricos
- El des-alineamiento en los ejes Y,Z tiene un valor restringido
- El movimiento el eje X, el eje se encuentra libre

Ejecución del estudio

Una vez definidas todas las condiciones de entorno, el sistema nos pide determinar que se desea analizar para nuestro caso seleccionaremos deformación y el factor de seguridad para realizar el análisis utilizando, el sistema de simulación

Figura 34. Determinación de los factores a solucionar

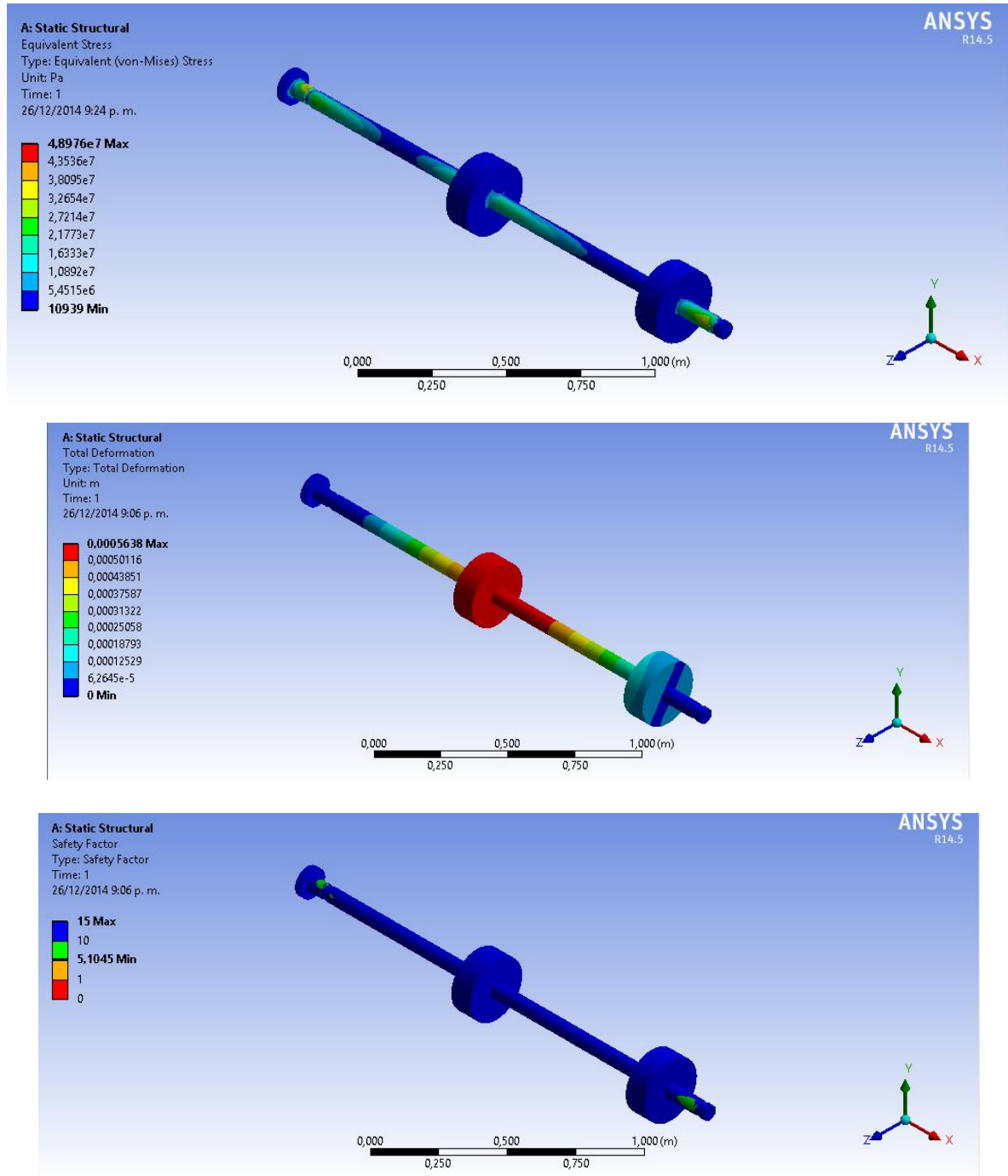


Fuente: Ansys

5.2.5.2 Resultados de la simulación

Los resultados obtenidos mediante el análisis por elementos finitos indican que aplicando la carga efectuada por el peso del molde, la resistencia a la ruptura es cercana a **48,976 MPa** (ver figura 34) además nos entrega un factor de seguridad de **5,1** pero este valor es para una condición estática

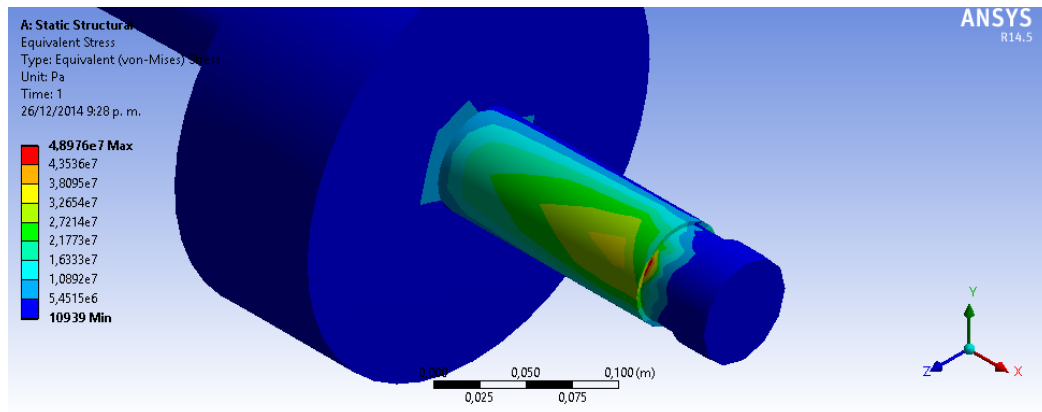
Figura 35. Resultados obtenidos de la simulación estática



Fuente: Ansys 14.5

En la siguiente figura podemos observar cómo se encuentra distribuida la tensión en uno de los puntos de mayor influencia.

Figura 36. Acercamiento de la simulación estática



Fuente: Ansys 14.5

El siguiente estudio nos permite tener un mayor nivel de confianza en el diseño, los valores entregados por el análisis de elementos finitos, se acercan en un buen porcentaje a la realidad.

5.2.6 Selección de los Rodillos del sistema de Transmisión

En el siguiente apartado se mostraran los factores que se tienen en cuenta para seleccionar el sistema de trasmisión. Para seleccionar el diámetro de los rodillos que se utilizaran para el conformado de piezas por fundición, se contó con el concepto un técnico en fundición

Tabla 12. Requerimiento para la Selección de Rodillos

Diámetro Interno de Fundición	RPM
15"	613

Fuente: Autor

Para Generar un Diámetro interno de 15" se requieren las siguientes condiciones, estos datos son tomados del concepto propio del técnico de fundición.

Tabla 13. Determinación de Componentes del sistema

Radio de transmisión del molde al rodillo	14,75"
Radio de Transmisión rodillo	8" -10"
Velocidad de rotación requerida molde	613 RPM
Radio de la Polea del Motor	2,5"

Fuente: Autor

5.3 Caracterización del molde de fundición

El molde de fundición cumplir con algunas recomendación entregadas por la Asociación de Fundidores Americanos, en el siguiente apartado se enunciaran el proceso de selección y algunas características de diseño que se tuvieron encuentra a la hora de realizar el pedido a la empresa que fabrico dicho molde

5.3.1 Selección del Molde de Fundición

Para el correcto desarrollo del proceso de fundición se requiere un molde que tenga un bajo coeficiente de fricción para permitir que el flujo del material fundido pueda fluir, además de la capacidad de liberar el calor rápidamente y durante el proceso y resistir la deformación por temperatura, teniendo en cuenta estos factores el material debe tener las siguientes características.

- Propiedades Auto lubricante
- Conductividad Térmica alta
- Capacidad de trabajo a alta temperatura
- Rigidez Dimensional a altas temperaturas

Para este caso se utilizó un molde en hierro fundido con un recubrimiento especial para facilitar la extracción, el cual fue elaborado por una empresa especializada en la fabricación de los mismos

Figura 37. Molde de fundición para camisa



Fuente: Autor

5.3.2 Determinación del diámetro exterior del molde

El diámetro de exterior del molde debe cumplir con algunos requisitos tales como son

- Durabilidad para el proceso de fundición
- Soporte durante el proceso de extracción

Para determinar el diámetro exterior del molde, se aplicó la fórmula que establece una relación entre el diámetro interno y el espesor, según la Asociación Americana de Fundición, este dato tiene como función ayudar en el proceso de conformado.

Ecuación 9. Fórmula para determinar el espesor del molde según la AFS

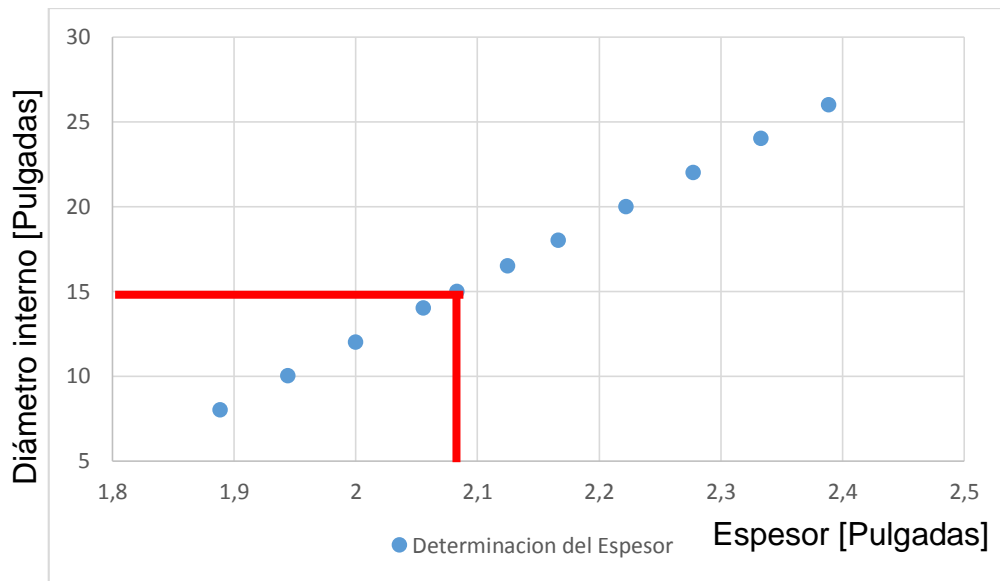
$$E = 1.75 + \frac{1,5}{54} * (d_{in} - 3) \quad (9)$$

E = espesor

D_{in} = Diámetro interno

Para la aplicación de esta ecuación que nos permite conocer el espesor de la pared del molde debemos definir las condiciones de funcionamiento requeridas (ver tabla 15)

Tabla 14. Determinación del espesor del molde vs diámetro interno de la camisa en Pulgadas



Diámetro interno (pulgadas)	Espesor de la pared (Pulgadas)
5	1,81
10	1,94
15	2,08
20	2,22
25	2,36
30	2,50

Fuente: Autor

Para nuestro caso tenemos un diámetro interno es de 15 Pulgadas para lo que se requiere un espesor mínimo tabulado por medio de la ecuación 9

Tabla 15. Resultado de la selección del espesor del molde

Diámetro interno del molde	Espesor Mínimo del Molde
15"	2,08"

Fuente: Autor

Teniendo en cuenta el valor mínimo requerido, se procederá a realizar una validación numérica y analítica para las cargas a las cuales se encontrara sometido el molde seleccionado a partir de las recomendaciones de la AFS

5.3.2 Validación analítica del espesor del molde

Para realizar la validación analítica, se aplicaran conceptos del libro resistencia aplicada de Robert Mott, con los conceptos que se encuentran en este documento podemos diferenciar si un cilindro es de pared gruesa o delgada, aplicando los siguientes criterios.

Ecuación 10. Relación para determinar si se presenta un cilindro de pared gruesa

$$\frac{Dm}{t} < 20 \quad (9)$$

Dm: Diámetro del cilindro

T: Espesor de la pared

Para nuestro caso, presentamos la siguiente relación

$$\frac{Dm}{t} = \frac{16,5''}{2,125''} \cong 7,77$$

Debido a que el resultado del cociente es menor a 20, el cilindro presenta la configuración de pared gruesa

5.3.3 Determinación del Valor la fuerza centrífuga

El cálculo de la fuerza centrífuga es una parte vital, debido a que es el principio que rige la fundición centrífuga. Para conocer el valor de esta fuerza debemos tener en cuenta 2 valores. Estos dos valores numéricos son la velocidad rotacional del sistema y una constante de fuerza G.

La constante de fuerza G utilizada para la fundición centrífuga se encuentra en un valor de 75 a 80 G y el valor de la velocidad rotacional la encontraremos resolviendo la ecuación 11

Ecuación 11. Ecuación para determinar el valor de la fuerza centrífuga

$$Gf = \frac{R * \left(\frac{\pi * N}{30} \right)^2}{G} \quad (10)$$

N= Velocidad Rotacional Rev/min

G= Es el valor de la gravedad a la que se encontrara sometido el molde

Luego de aplicar la ecuación encontramos un valor para la velocidad rotacional del sistema

$$N \cong 613 \text{ Rev/min}$$

5.3.4 Validación numérica del molde

A continuación se muestran los datos del comportamiento del sistema, sometido a la velocidad de rotación del molde para realizar el análisis contamos con los datos necesarios para realizar una validación con el Software de Elementos finitos (Ansys V14.5 Academic Version) con el fin de conocer el comportamiento del sistema de fundición.

5.3.4.1 Descripción del Procedimiento

Para obtener unos resultados validados mediante el software de elementos finitos, se tendrán en cuenta factores tales como son

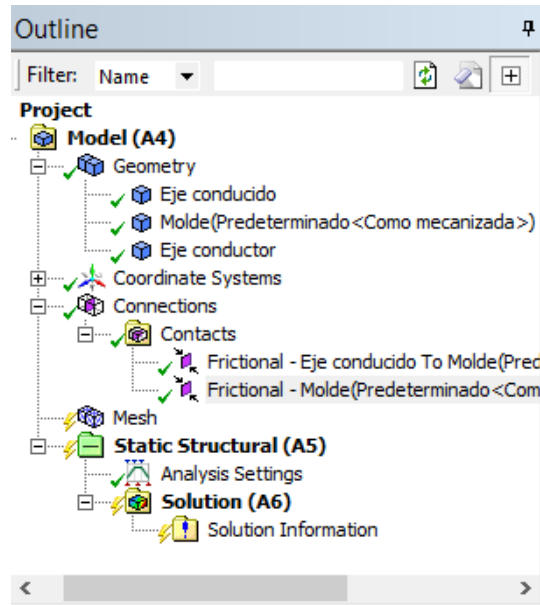
- Velocidad rotacional
- Potencia Transmitida al sistema
- Relación de Equilibrio del montaje

Este análisis se realiza bajo los resultados obtenidos en el apartado 5.2.5, agregando la condición de rotación.

Análisis de la Geometría

- Propiedades: Acero AISI 1020
- Unión por junta atornillada
- Tipo de Análisis: Estático estructural

Figura 38. Caracterización del análisis estructural

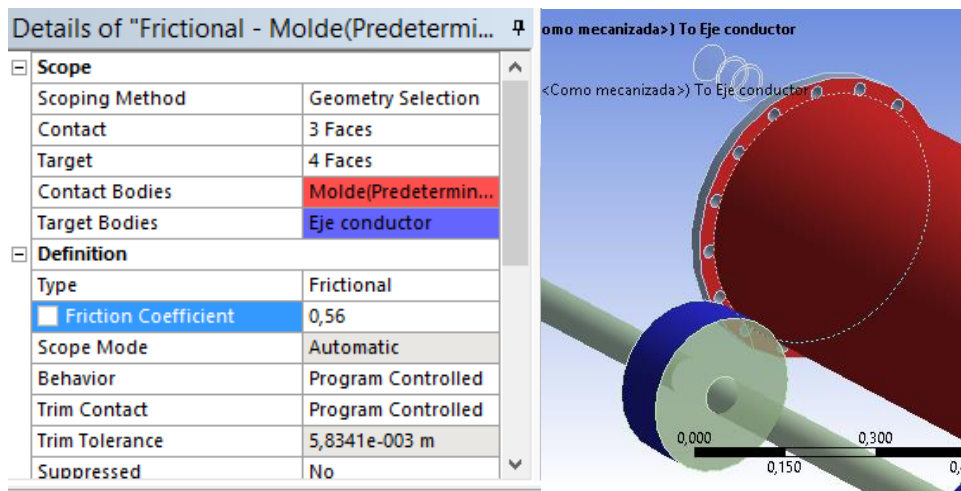


Fuente: Ansys 14.5

Descripción de la Situación

El siguiente análisis compone la simulación por elementos finitos de un ensamble, por lo que se debe definir el tipo de conexión presente entre los elementos con el fin de lograr unos mejores resultados.

Figura 39. Determinación de las condiciones de contacto



Fuente: Ansys 14.5

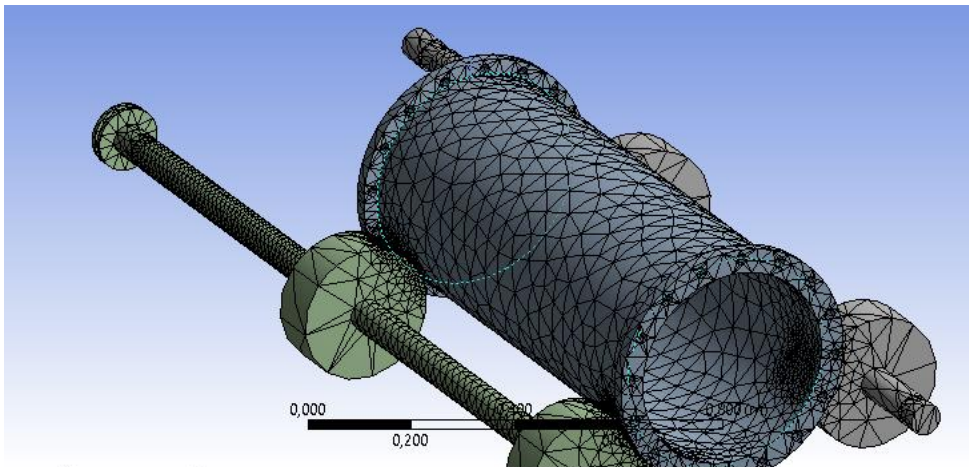
Para las condiciones de contacto se define el tipo **Frictional** y se define el factor para el contacto de metal con metal que es ($\mu = 0,56$)

A continuación se define el tipo de contacto que se seleccionó para la presente validación

Frictional: superficies se les permite deslizarse por el coeficiente definido por el usuario de fricción ($\mu =$ usuario define) y se puede abrir y cerrar. Esto es real como tener dos superficies de deslizamiento uno contra el otro. Se producirá después de que el valor de la resistencia del umbral de esfuerzo de corte en función de la μ deslizante²⁶

Análisis de Malla

Figura 40. Enmallado utilizando en la simulación de ensamblaje

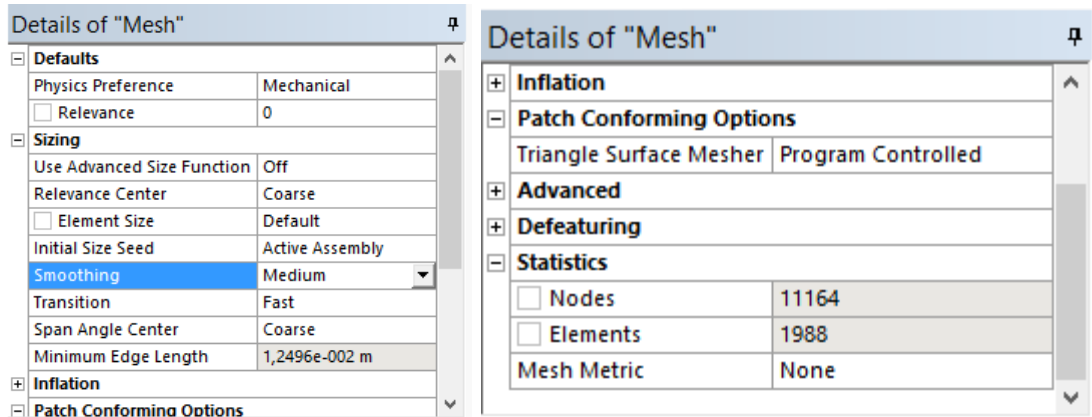


Fuente: Ansys 14.5

Para el proceso de mallado se realizaron algunas caracterizaciones con respecto a la cantidad de nodos debido a que la versión académica de Ansys nos limita con respecto a la cantidad, por eso la relevancia de la malla por lo que se aplicó un factor de 0.

²⁶ ANSYS Principles of Simulating Contact Between Parts using ANSYS
<http://www.ansys.com/staticassets/ANSYS/staticassets/resourcelibrary/confpaper/2002-Int-ANSYS-Conf-201.PDF>

Figura 41. Detalles del proceso de mallado

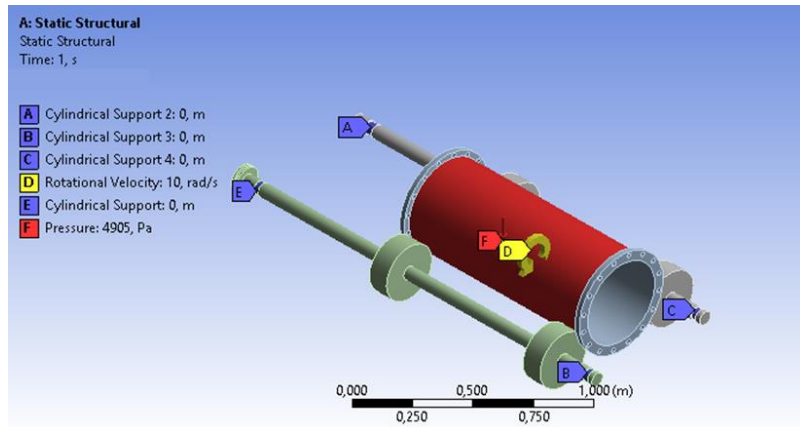


Numero de nodos elementos: 11,164 nodos

Definición de cargas y restricciones

Los siguientes aspectos a definir son el tipo de contacto que se produce entre los elementos del estudio y también los movimientos permitidos para cada uno de los componentes.

Figura 42. Cargas aplicadas a la simulación del sistema de fundición



Fuente: Ansys 14.5

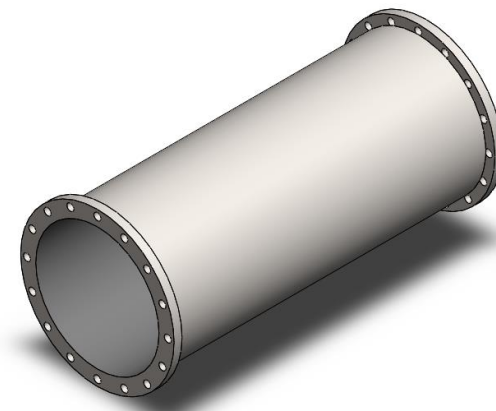
En referencia a la posición y desplazamiento, se determinaron las siguientes condiciones

-Los cuatro puntos de apoyo se definieron, como soportes cilíndricos

- La carga por el molde, fue necesario definirla como una presión y se determinó por componentes, debido a que al colocar el componente como una fuerza en el centroide, el programa de simulación nos entrega un error que no nos deja continuar

-El molde se encuentra libre en todas las direcciones, con el fin de verificar su comportamiento ante la velocidad de giro

Figura 43. Geometría del Molde de la Camisa

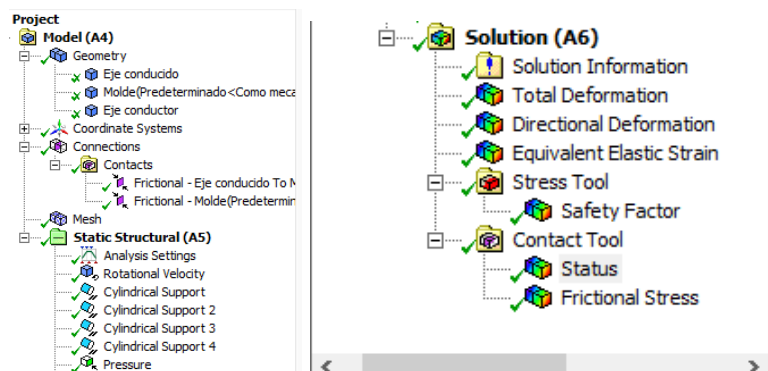


Fuente: Solidworks

Ejecución de estudio

Luego de definir las condiciones de entorno, el sistema nos pide determinar qué tipo se desea analizar para nuestro caso, seleccionaremos el módulo de deformación direccional y el factor de seguridad.

Figura 44. Determinación de los factores a analizar



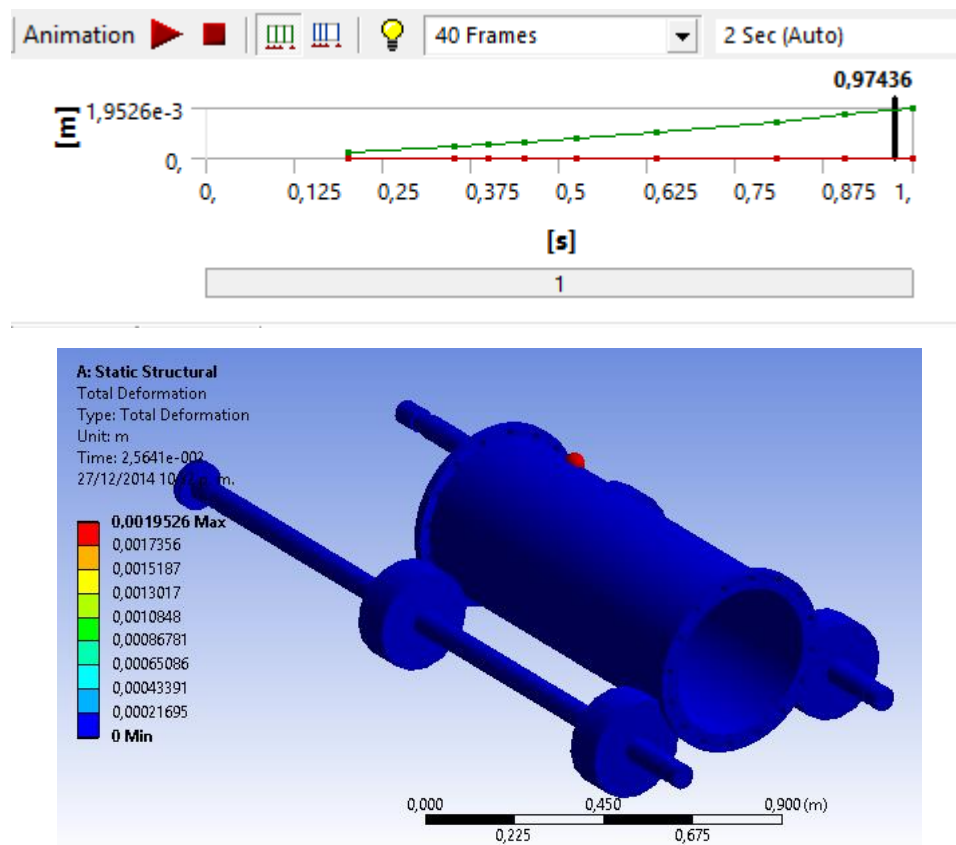
Fuente: Ansys 14.5

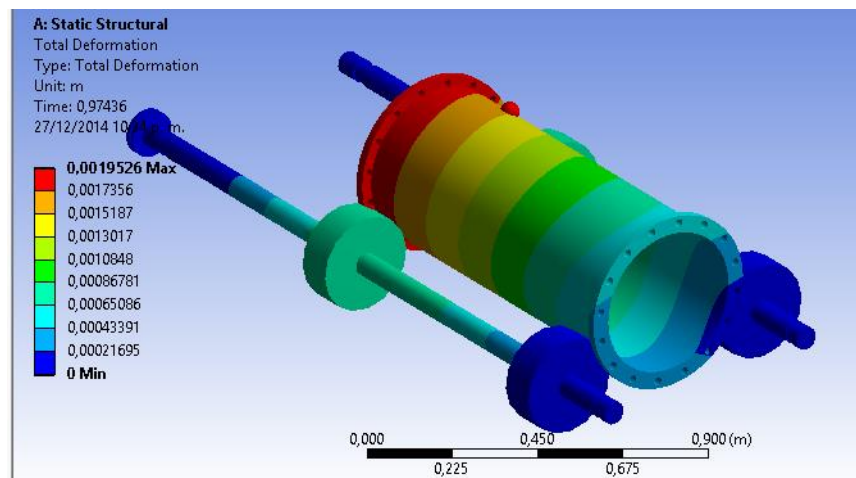
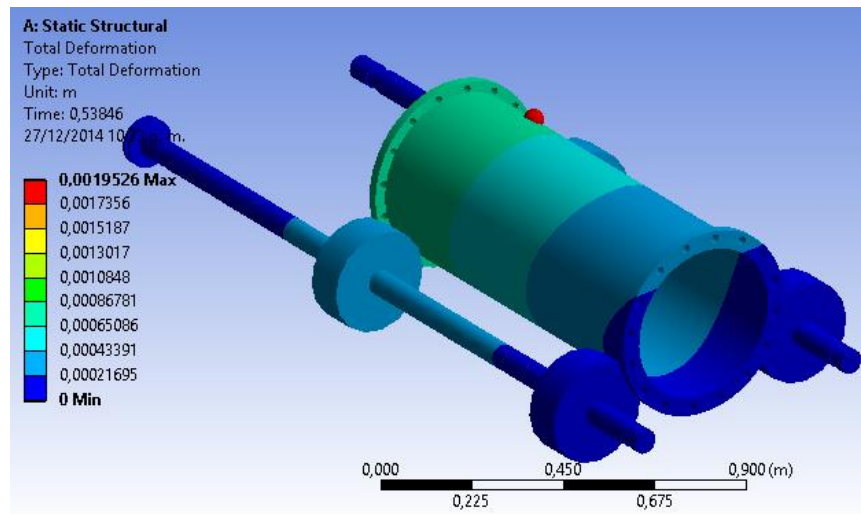
5.3.4.2 Resultados de la simulación

Los resultados obtenidos mediante el análisis por elementos finitos indican que aplicando el efecto de la carga rotacional, reducen el factor de seguridad pero aun con esta reducción se encuentra en un valor alto (**4,128**), el objetivo de esta simulación es conocer que tanto afecta la condición de contacto sobre el sistema y verificar el posible desalineamiento, el cual según la simulación tiene un valor de **0,0019526mm**, pero teniendo en cuenta la magnitud del sistema y el proceso que se desea llevar acabo, es pertinente continuar.

A continuación se analizara la deformación presente en el sistema en función del tiempo

Figura 45. Análisis de resultados, prueba de deformación





Fuente: Ansys 14.5

Los datos anterior mente analizados, entregan la confianza para continuar con el proceso. En el siguiente apartado se relacionara la velocidad de rotación con la calidad del producto final

5.3.5 Velocidades de Rotación durante el proceso de fundición

Según la Asociación de fundidores americanos, luego de determinar el diámetro interno se debe considerar una velocidad de rotación máxima, dependiendo del material a fundir por el método de centrifugado, en nuestro paso es Hierro gris.

Tabla 7. Determinación de la Velocidad Máxima de Rotación

Diámetro Interno	Velocidad de Rotación Máxima
0" – 5"	850 RPM
5" – 10"	723 RPM
10"- 15,5"	613 RPM

Fuente: AFS

Durante el proceso de fundición este pico de velocidad se debe alcanzar en las 3 fases, las cuales se enuncian a continuación.

- Etapa de vertido
- En la medida que el metal llega al extremo del molde
- Velocidad constante para alcanzar el espesor necesario del molde

En la etapa de vertimiento se debe cuidar de permitir impurezas en el vertimiento para que evitar el daño del molde función, para el vertimiento se deben tener en cuenta algunos factores tales como son²⁷.

- La razón a la que se deja verter el material a lo largo de la longitud del molde
- La razón de enfriamiento al momento de contacto con el molde

Teniendo en cuenta el primer factor, facilita de una gran manera controlar los siguientes variables.

- Generar un flujo laminar en la fundición
- Generar una distribución uniforme
- Reducir los salpiques y posibles pérdidas de material

²⁷ CENTRIFUGAL CASTINGS, INC Fundición centrífuga Documentos,[En línea] [Citado 14 de diciembre de 2014] www.centrifugal.net

Figura 46. Fundición Centrifuga



Fuente: Autor

Las anteriores variables dependen de la **temperatura de fundición, la velocidad de rotación** y del perfil en que se entrega al molde

Algunos problemas que se pueden experimentar por no controlar la velocidad de rotación.

- Velocidad de rotación alta, puede ocasionar vibraciones que pueden terminar en una segregación circunferencial ocasionando grietas en la fundición
- La velocidad alta puede ocasionar derrames de la fundición.

5.4 Diseño del Vertedero

Luego de analizar las condiciones de diseño para la parte funcional del sistema, se requiere analizar un modelo que permita direccionar el flujo de material fundido, al molde centrífugo

5.4.1 Análisis de necesidades del Vertedero

El material necesario para el Vertedero debe tener las siguientes características

- Elevado punto de fusión
- Un recubrimiento refractario que permita contener y permitir que fluya rápidamente
- Poseer un canal para la conducción del metal líquido hasta el molde giratorio

5.4.2 Dimensionamiento del Vertedero

De acuerdo a las condiciones de flujo, se determina unas dimensiones generales para las camisas en general, las siguientes condiciones se definen por conocimiento del técnico encargado de la fundición.

Tabla 10. Determinación de dimensiones vertedero

Diámetro	5"	1,5"
Espesor	3/4"	1/4"
Largo	10"	12,5"

Fuente: Autor

5.4.3 Selección del Material Canal de Vertedero

Tabla 11. Especificaciones técnicas para el vertedero

Material Metálico	Hierro
Temperatura de Fusión	1535 °C
Material de Revestimiento	Cemento refractario (Horno)
Temperatura de Operación Máxima	1150 °C

Fuente: Compañía General de Aceros, Manual de materiales

Tabla 12. Especificaciones técnicas para el vertedero del recibidor

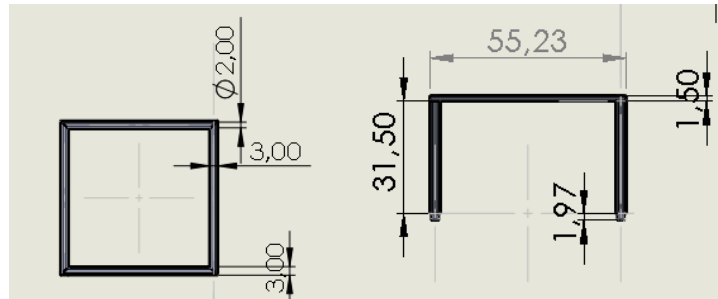
Material Metálico	Hierro
Temperatura de Fusión	1535 °C
Material de Revestimiento	Cemento refractario (Horno)
Temperatura de Operación Máxima	1150 °C

Fuente: Compañía General de Aceros, Manual de materiales

5.5 Diseño de la estructura de soporte externa

La estructura externa es la base de forma y figura para el sistema de fundición centrífugo, para ello se especifica un modelo de estructura cuadrado con el fin de tener una correcta distribución de cargas

Figura 47. Dimensionamiento de la estructura externa



Fuente: Solidworks

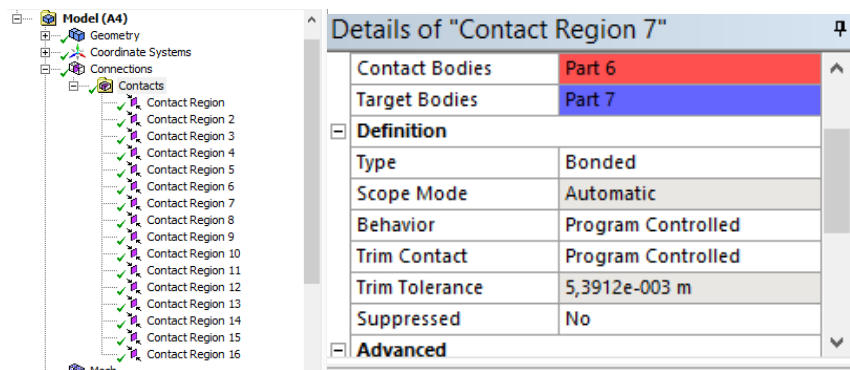
5.5.1 Validación numérica de la estructura externa

El análisis fue realizado por medio del software de elementos finitos (Ansys 14,5 Academic Version). Correspondiente a un análisis estático estructural que será aplicado al marco que soportara la estructura de la centrifuga

5.5.1.1 Análisis de Contactos del Sistema

Debido a que la estructura externa se requiere para brindar soporte al sistema todas las uniones se realizaron por medio de soldadura, de forma consecuente todos los contactos en el análisis se consideraran (Bounded) Soldados

Figura 48. Selección del tipo de contacto más adecuado para la estructura externa



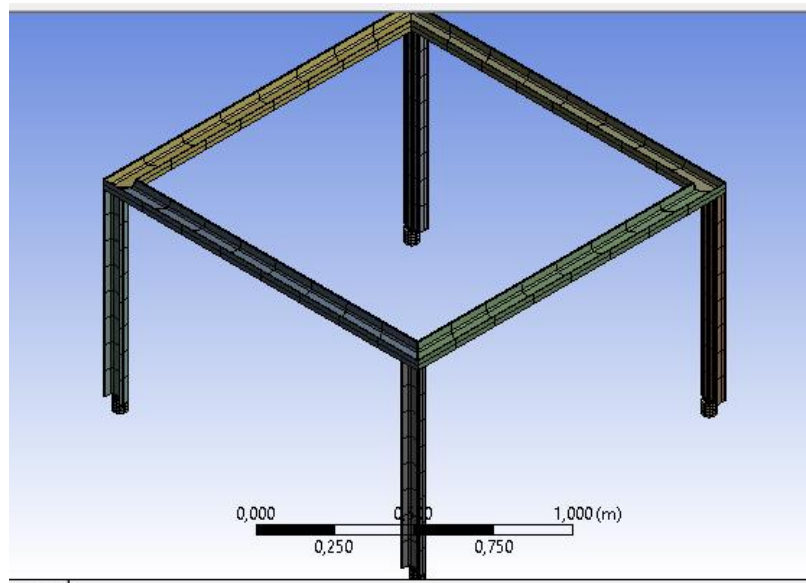
Fuente: Ansys 14.5

A continuación, se explica cómo funciona este tipo de selección de contacto

Bonded: Ambas superficies se encuentran unidas con pegante. No se permite separación. No se permite Slide. Las superficies estarán juntos independientemente de - brecha, la penetración, la carga y el comportamiento de otras partes / contactos.²⁸

Condiciones a analizar: Deformación Total, Producto de las Cargas

5.5.1.2 Análisis de Malla



Details of "Mesh"	
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
<input type="checkbox"/> Relevance	-80
Sizing	
Inflation	
Patch Conforming Options	
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Advanced	
Defeaturing	
Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	11164
<input type="checkbox"/> Elements	1988
Mesh Metric	None

Fuente: Ansys 14.5

²⁸ ANSYSPrinciples of Simulating Contact Between Parts using ANSYS
<http://www.ansys.com/staticassets/ANSYS/staticassets/resourcelibrary/confpaper/2002IntANSYSConf-201.PDF>

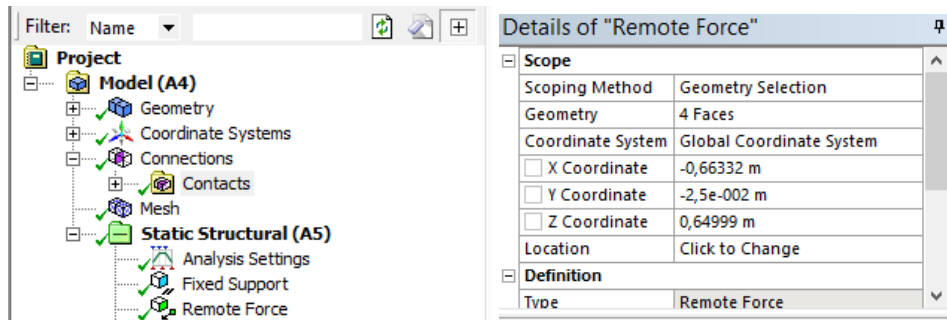
Cantidad de Nodos : 11164

Para realizar el mallado del elemento fue necesario reducir la relevancia a un valor de -80, debido a que la cantidad de nodos imposibilitaban la realización del análisis a causa de la licencia académica de Ansys 14.5

5.5.1.3 Defición de cargas y restricciones

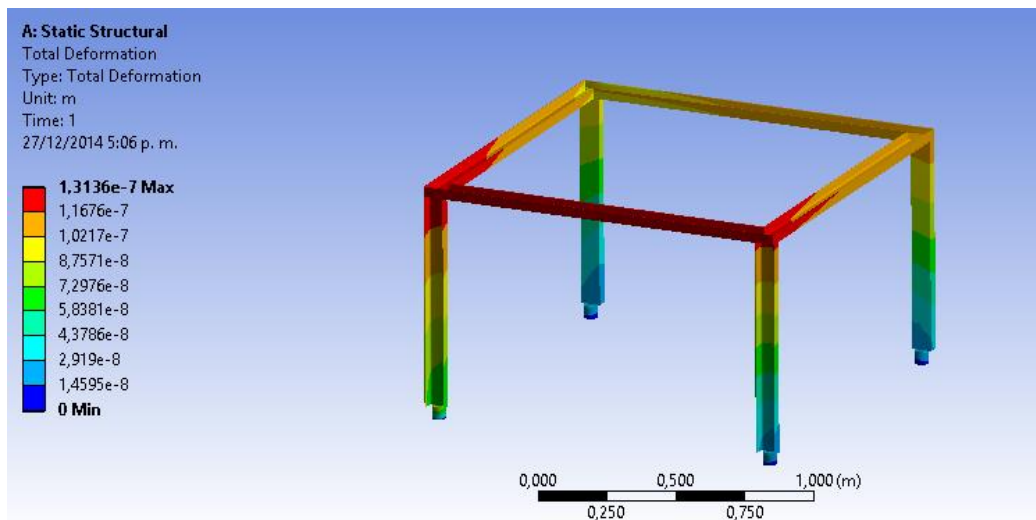
En este análisis al definir el tipo de contacto como bounded, los movimientos quedaron restringidos y la figura se considera con una tendencia baja a la deformación

Figura 49. Descripción de las cargas aplicadas al sistema



Fuente: Ansys 14.5

Figura 50. Análisis estructural del marco de soporte Centrifuga



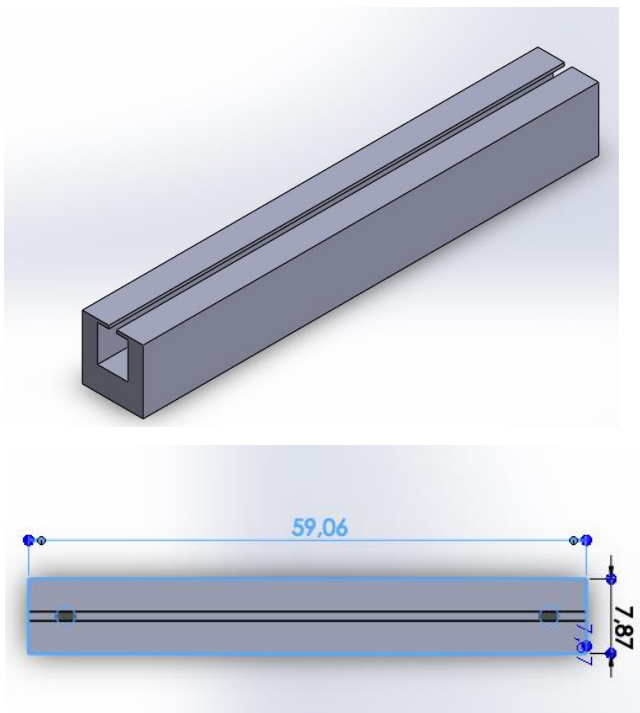
Fuente: Ansys 14.5

En el plan de trabajo se enuncian las tareas, que son necesarias para la construcción del prototipo.

6.1 Compra de Materiales

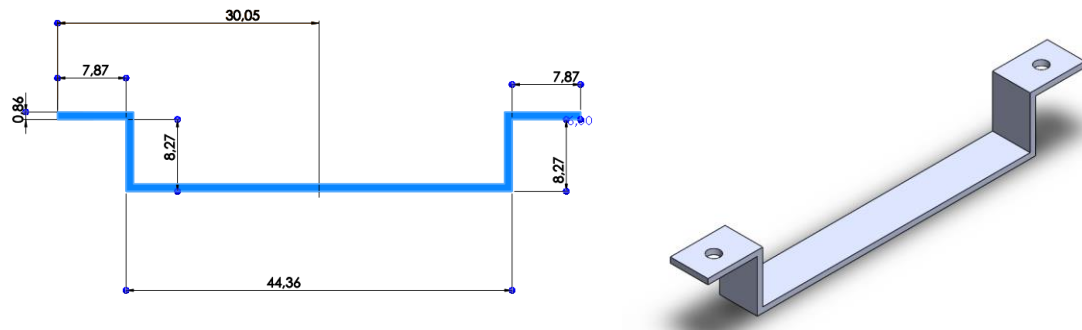
Para la elaboración de la base se compraron Ángulos de Hierro de 3" x 1/2 para hacer la construcción y para la estructura perfiles de 1" x 1/2

Figura 52. Esquemático de los Materiales Utilizados



Fuente : Autor

Figura 53. Isométrico del travesaño de la base



Fuente : Autor

6.2 Corte de los Materiales

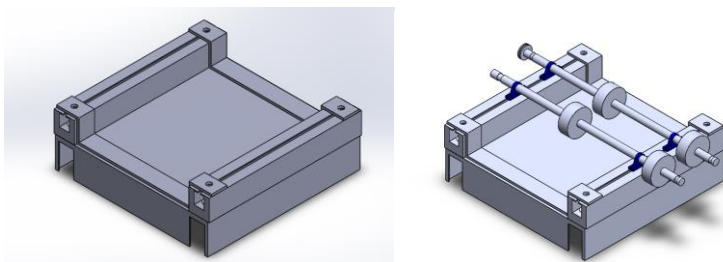
El proceso del corte lo realizo directamente la empresa a la que se le realizo la compra.

6.3 Proceso de soldado y construccion

Para la construccion de la base se realizaron los siguientes pasos

- Proceso de Soldadura para realizar las respectivas uniones
- Corte de Platinas y tubería
- Conformado de la parte superior
- Soldadura de la parte superior
- Instalación de chumaceras, soportes
- Montaje de ejes y rodillos para la transmisión

Figura 54. Montaje de la plataforma e instalación de los rodillos



Fuente: Solidworks

Figura 55. Travesaño instalado



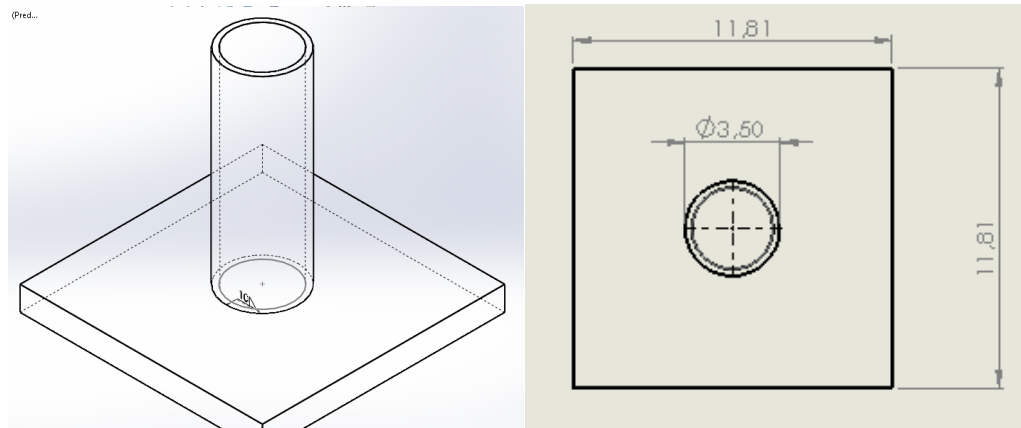
Fuente: Autor

6.4 Fabricación del vertedero

La fabricación del vertedero se basa en el numeral 5.4, el proceso construcción debe seguir los siguientes pasos.

- Verificación del Dimensionamiento
- Compra de Materiales
- Corte y perfilado de los elementos
- Soldado de uniones rígidas
- Ensamblaje de partes móviles

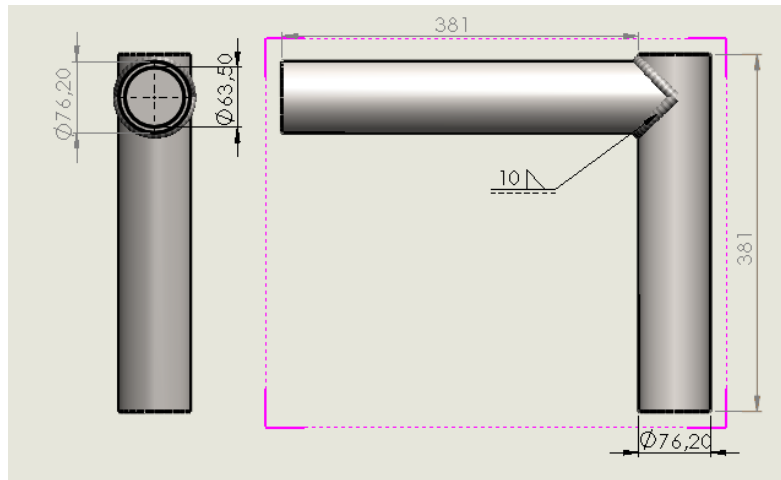
Figura 56. Dimensionamiento de la base del vertedero



Fuente: Autor

La base del Vertedero es un soporte fijo, el cual es base para el brazo articulado, que se encargara del soportar la cuchara o guía para el material de fundición

Figura 57. Dimensionamiento del brazo giratorio

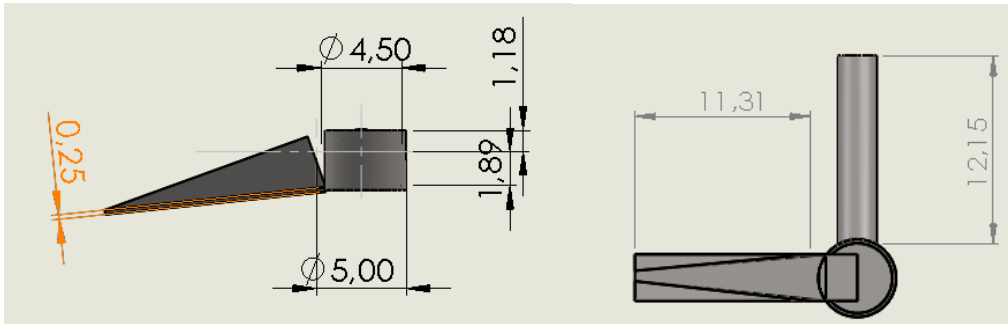


Fuente: Autor

La cuchara del Vertedero, requiere la aplicación de un recubriendo especial para la utilización a altas temperaturas y permitir el libre flujo del material.

A continuación se muestra el dimensionamiento CAD de la cuchara del vertedero que va ensamblada en el brazo giratorio.

Figura 58. Dimensionamiento de la cuchara del vertedero



Fuente: Autor

Luego de realizar el proceso de dimensionamiento, construcción y corte de los materiales, el producto final del vertedero se muestra a continuación.

Figura 59. Vertedero construido para el sistema centrífugo



Fuente: Autor

Figura 60. Sistema de Centrifugado Terminado



Fuente: Autor

7. PRUEBAS DEL PROTOTIPO DE FUNDICIÓN CENTRIFUGA

Para el presente sistema no fue posible realizar una prueba preliminar, debido a que para realizar el proceso requiere el material en su punto de fusión y para la manipulación se necesita personal capacitado y con experiencia en la labor, por lo tanto el prototipo se instaló en la empresa VAL. LTDA, esta empresa tiene entre su planta física un horno que cuenta con las dimensiones y características necesarias para la ejecución del proceso

7.1 Ejecución del proceso

El proceso consta de la preparación del molde en diferentes procesos desde el montaje en la maquina con el fluido antiadherente y el proceso de preparación de la colada de fundición. El proceso consta de 10 minutos entre el proceso del traslado de la colada de fundición y el inicio del tiempo de enfriamiento

Figura 61. Sistema de Fundición Centrifuga con el molde de camisa de 15 Pulgadas



Fuente: Autor

Figura 62. Molde de la camisa durante el proceso



Fuente: Autor

La imagen 1 muestra el molde con la solución antiadherente, la imagen 2 muestra el molde realizando el proceso de centrifugado, la imagen 3 muestra el producto listo para el proceso de extracción

7.2 Análisis Térmico del proceso

En el siguiente apartado se analizará el comportamiento del molde frente a la condición de temperatura en el proceso de enfriamiento, los datos de temperatura (ver tabla 15) se tomaron durante la última prueba del sistema de fundición, la simulación se realizará por medio de una verificación numérica de elementos finitos

7.2.1 Proceso de Enfriamiento

El proceso de enfriamiento de la fundición empieza desde el momento mismo cuando es retirado del horno y se intensifica en el vertimiento en el molde.

En el proceso de enfriamiento debido a la velocidad de rotación del sistema se presenta una pérdida de calor con convección este tiempo por metodología se establece en 10 minutos para facilitar la extracción

7.3 Simulación de Transferencia de Calor

Con el fin de conocer el comportamiento del molde durante el proceso de fundición, la variable de temperatura se registró durante todo el proceso (ver tabla 16), luego por medio de la validación con el código de elementos finitos (ANSYS

ACADEMIC V14.5), podemos simular las condiciones del flujo de calor durante el proceso.

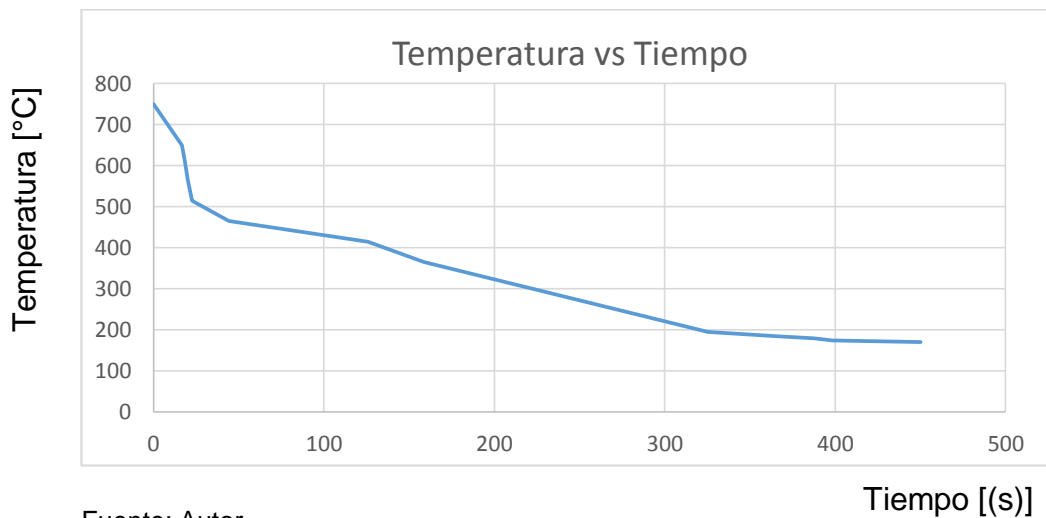
Condiciones de frontera

Temperatura Ambiente: 22 °C

Tabla 16. Registro de Variable de Temperatura vs Tiempo.

T(C°)	750	745	650	615	565	465	415	365	200	195	190	185	180	175	170
T(s)	0,53	0,73	16,6	18,3	20,02	22,69	24,3	26,0	58,7	320	325	345	365	387	450

Figura 63. Grafica de Temperatura vs Tiempo

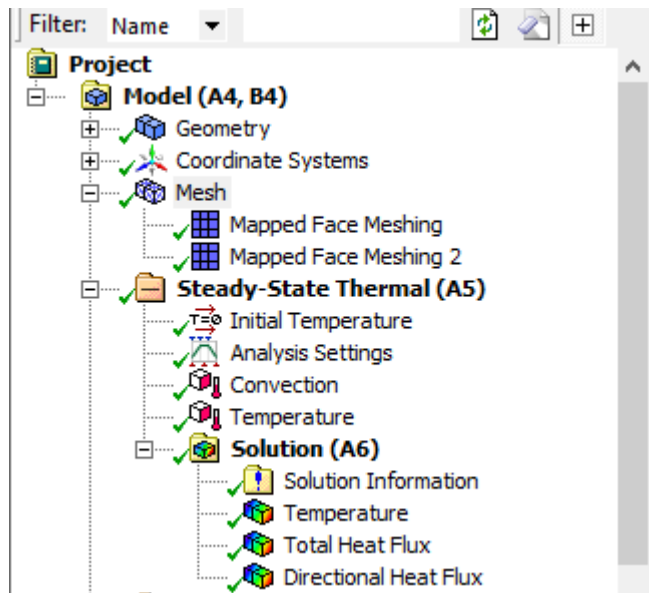


Fuente: Autor

Tipo de Análisis: Transferencia de Calor estable

Componentes del Análisis

Figura 64. Componentes del análisis de calor estable



Fuente: Ansys 14.5

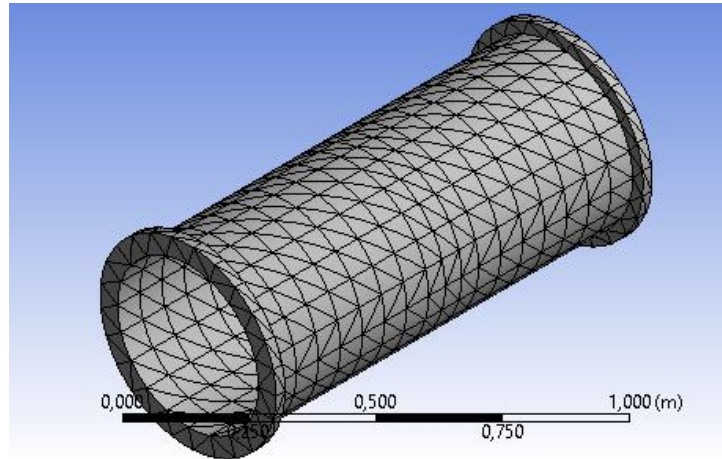
7.3.1 Análisis de Malla

Figura 65. Detalles del mallado para el análisis de transferencia de calor

Details of "Mesh"	
+	Inflation
-	Patch Conforming Options
	Triangle Surface Mesher Program Controlled
+	Advanced
+	Defeaturing
-	Statistics
<input type="checkbox"/>	Nodes 4565
<input type="checkbox"/>	Elements 2210
	Mesh Metric None

Fuente: Ansys 14.5

Figura 66. Proceso de mallado del molde

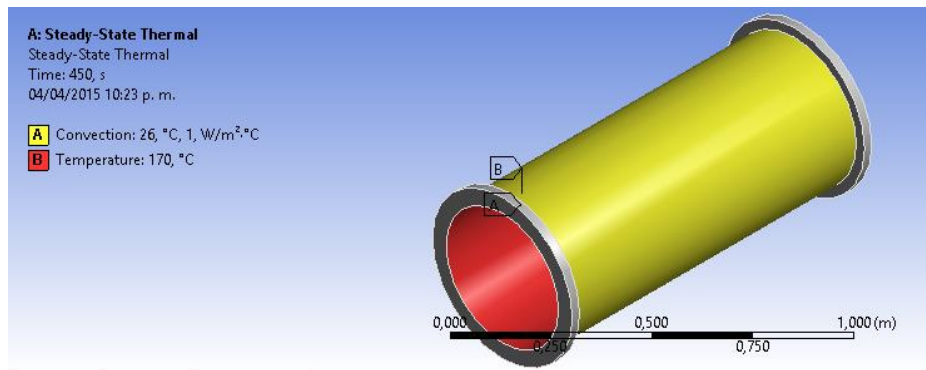


Fuente: Ansys 14.5

Numero de Nodos: 4565 Nodos

7.3.2 Definición de condiciones

Figura 67. Determinación de condiciones para el análisis térmico

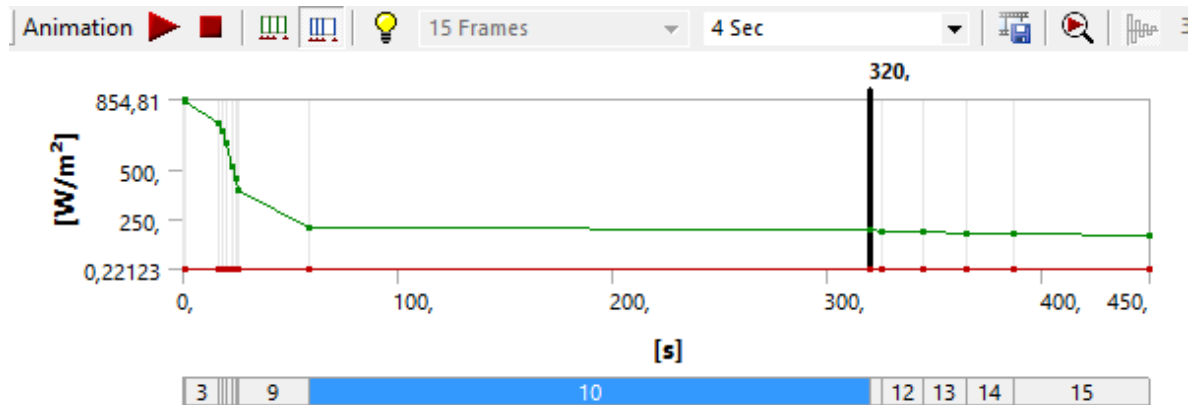


Fuente : Autor

7.3.3 Análisis de resultados

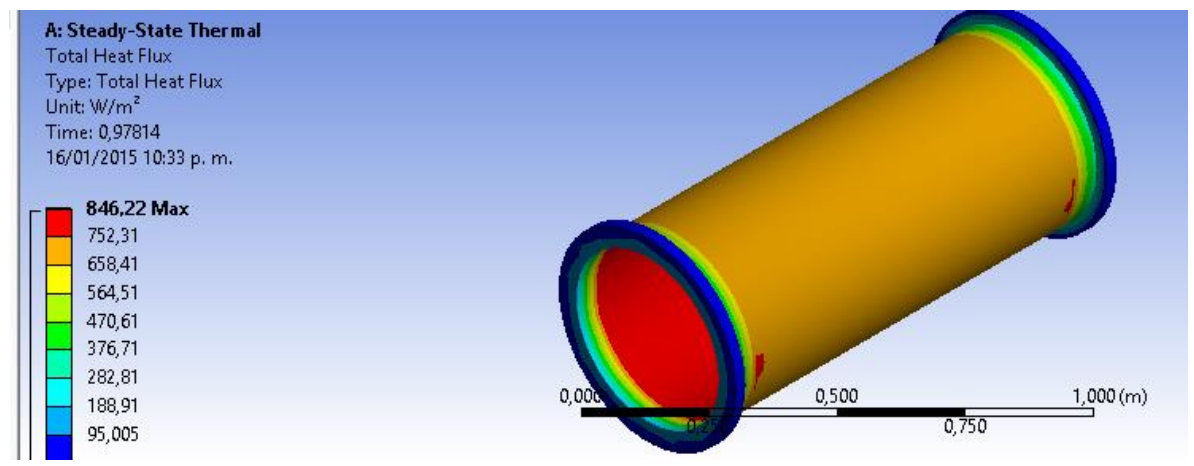
El análisis del flujo de calor se determinó por medio de los datos obtenidos durante la prueba de funcionamiento, a continuación se mostrara los resultados, los informes de dicho análisis, se encuentran en los anexos.

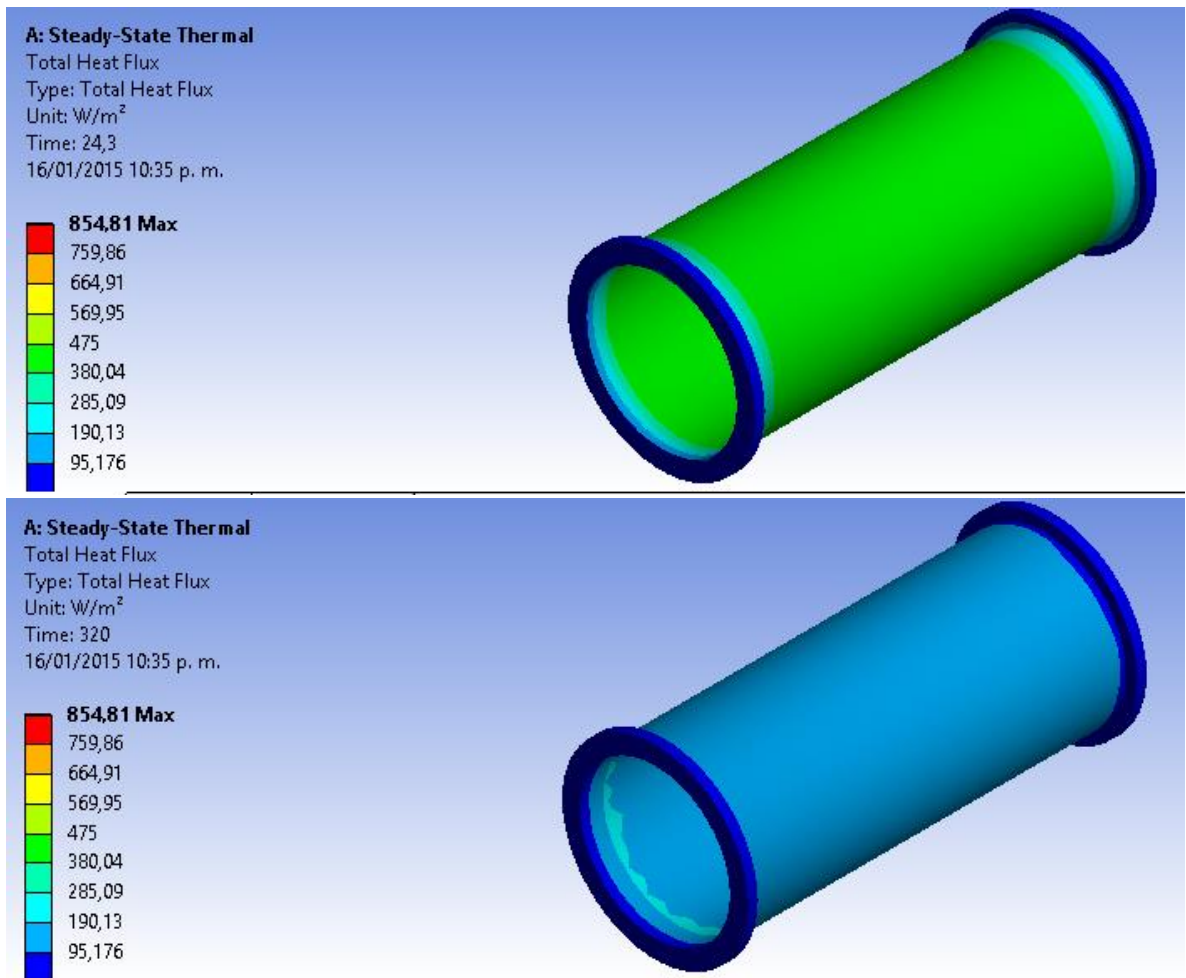
Figura 68. Resultados del análisis de flujo de calor



Tabular Data

	Time [s]	✓ Minimum [W/m ²]	✓ Maximum [W/m ²]
2	0,73	1,1063	847,98
3	16,6	0,95868	734,84
4	18,3	0,90491	693,62
5	20,02	0,82809	634,74
6	22,69	0,67446	516,98
7	24,3	0,59764	458,1
8	26,	0,52082	399,22
9	58,7	0,26732	204,91
10	320,	0,25964	199,02
11	325,	0,25196	193,13
12	345,	0,24428	187,24
13	365,	0,2366	181,35
14	387,	0,22892	175,47





Fuente: Ansys 14.5

- Las condiciones del material y el acabado del molde, aseguran que la distribución de calor real, sea cercana a la que se muestra en el análisis
- El sensor de temperatura presenta el inconveniente de que rango de medida llega hasta 750°C
- Aproximadamente a los 7 Minutos la camisa de hierro se encuentra a una temperatura segura para su extracción
- La distribución de temperatura es estable en el molde.
- Para conocer el comportamiento real del molde, sería recomendable realizar un análisis de flujo, pero debido a que no se cuenta con una licencia, el límite de nodos, nos imposibilita el análisis

7.4 Producto Final y post- proceso

Luego de la extracción de la camisa, inicia un proceso de enfriamiento natural durante 6 horas.

Figura 69. Producto final, entregado por la Centrifuga



Fuente: Autor

7.4.1 Post- proceso de Fundición

Figura 70. Post-proceso del producto final de la fundición



Fuente: Autor

Luego del proceso de enfriamiento natural, se procede a la fase de maquinado y desbarbado de las camisas, para darles su acabo final.

Figura 71. Acabo final de las camisas de hierro gris



Fuente: Autor

8. RESULTADOS

Los resultados conseguidos durante el proyecto se analizaran teniendo en cuenta el acabado del producto final.

El producto acabo del producto final se encuentra entre los rangos de aceptación del producto, por lo que en teoría la aplicación del sistema de centrifugado para grandes diámetros se considera útil.

Entre los resultados más relevantes, se destaca la reducción de material necesario a la hora de realizar el proceso de fundición, debido a que aplicando los conceptos de ingeniería se llegó a reducir el diámetro de la final de la camisa antes del pre-maquinado.

Para tener en cuenta, la intensión del control de velocidad para este proyecto no fue posible, debido a que se presentaron inconvenientes en la consecución de un sistema que se encontrara diseñado para el ambiente de trabajo.

La validación de los datos de temperatura y sus curvas, fue esencial para determinar el comportamiento y el momento más adecuado para la extracción de la camisa, durante la prueba de funcionamiento, ninguna camisa se quedó atascada en el molde o matriz de fundición, este evento era algo cotidiano a la hora de realizar el proceso de fundición antes de la realización del proyecto.

La calidad del producto final fue evaluada por medio de estudios metalográficos entregando una composición perlítica de buena calidad los estudios se muestran en los anexos.

Las variables que se tuvieron en cuenta para la ejecución de este proyecto

- Tiempo de ejecución del proceso de fundición
- Tiempo de maquinado
- Calidad del acabo superficial e interno de la camisa de hierro gris

9. OBSERVACIONES

- Debido a la falta de experiencia o confianza en el campo de la fundición centrífuga, la mayoría de las empresas, trabaja sus necesidades de fundición, aun con variantes de fundición en tierra y nodulares
- Durante el proceso de fundición no se pudo monitorear el valor real, al que entra el metal fundido al molde
- El sistema se construyó en su totalidad en acero 1020, por fácil consecución en el mercado y precio
- El material de las camisas de hierro gris, tiene su origen en repuestos de motor y chatarra de hierro gris, el cual es procesado y seleccionado
- Durante el proceso de fusión del material se retiran las impurezas que son visibles a simple vista
- La aplicación del sistema de control de velocidad no fue posible, debido a las condiciones de trabajo, pero en un fase posterior de diseño se contempla la opción
- El área de contacto de los rodillos con el molde es un factor que afecta la velocidad de rotación del molde, reducir esta área de contacto será materia de la siguiente fase de diseño
- El tiempo de fundición debe estandarizarse para evitar que las camisas de hierro gris se queden atascadas en las matrices y puedan dañar los moldes

10. CONCLUSIONES

- Aunque no era de los objetivos cumplir con la norma ASTM A48 que rige las propiedades de las camisas de hierro gris, luego de realizar las respectivas pruebas metalográficas, se encuentra que los valores de la fundición cumplen con los estándares de dicha norma, en criterios de formación estructural y dureza
- La calidad del producto antes del pre maquinado supero en el régimen visual y de inspección a las camisas que la empresa había comprado en ocasiones anteriores a empresas dedicadas a la fundición tradicional
- El diseño del sistema de fundición centrifugo fue posible gracias a la aplicación del software CAD que permitió realizar rediseños y seleccionar el mejor método de conformado para estas camisas
- La construcción del sistema de fundición se hizo en un tiempo record de fabricación, debido a que se requería responder a una solicitud de fabricación de camisas de hierro gris.
- Se espera que para posteriores pruebas se pueda contar con el equipo de control de la velocidad de rotación y poder aumentar la calidad del producto en su fase conformado
- El costo del proyecto vs el costo de las camisas de hierro gris, compradas a otras empresas tiene una tasa de retorno alta, debido a que el costo por camisa de hierro gris se redujo en un 60%
- La calidad del producto propio comparado con el producto comprado en el mercado, obtiene una mejor calificación en la escala de presentación de acabado superficial y estructural

11. RECOMENDACIONES



Las siguientes recomendaciones buscan optimizar y mejorar el proceso de fabricación de camisas de hierro gris a nivel de Santander

- El proceso de fundición centrífuga es un método que se debe aplicar a los elementos simétricos, no solo por su calidad, si no por el tiempo que se emplea en la fabricación
- Cuando se implementa, la automatización industrial al proceso de fundición los acabados superficiales mejoran y el proceso de maquinado se hace menos tedioso
- La fundición es una parte esencial que cada empresa debe tener en su proceso productivo.
- El proceso de diseño de máquinas de fundición por centrifugado que entreguen camisas de hierro gris con un valor de espesor cercano al final, en una tarea de diseño ardua y extensa.
- Variables como la temperatura y la velocidad de rotación, son críticas a la hora de controlar, sobre todo cuando el proceso consta de minutos para ser irreversible

12. ANEXOS

Anexo A

A continuación se muestran los resultados del estudio metalográfico

 IMATT LTDA.	INFORME DE LABORATORIO		 Certificado CO05/990 Servicios de tratamiento térmico, mecanizado <u>industrial y laboratorio</u>
	COD. FRLM-01	REV. No. 02	
	FECHA: 02/08/05	PAG. 1 de 1	

INFORME No. 05	FECHA: 20-01-2015
CLIENTE: DE WILLIAMS SERVICIOS	

DESCRIPCION DE LAS PIEZAS:




PRUEBA(S) SOLICITADA(S): Análisis Metalográfico

IDENTIFICACION DE LA MUESTRA: Orden de Pedido. 27455

PROBETA #1 : C-11.75-1

PROBETA #2 : C-11.75-2

PROBETA #3 : C-11.75-3

PROBETA #4 : C-11.75-4

PROBETA #5 : C-11.75-5

PROBETA #6 : C-11.75-6

CANTIDAD DE PIEZAS CUBIERTAS POR ESTE INFORME:6

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS:

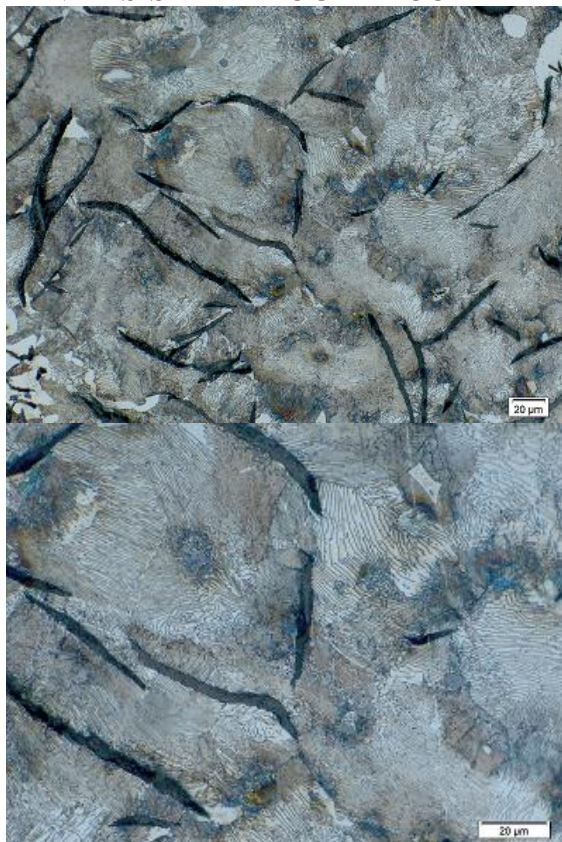
PROBETA #1 C-11.75-1

ANALISIS DE GRAFITO



Fundicion gris sin ataque 100X
tamaño #5 -tipo:B

1.1 ANALISIS METALOGRAFICO MATRIZ



Fundicion Gris con ataque
Ataque

1000X

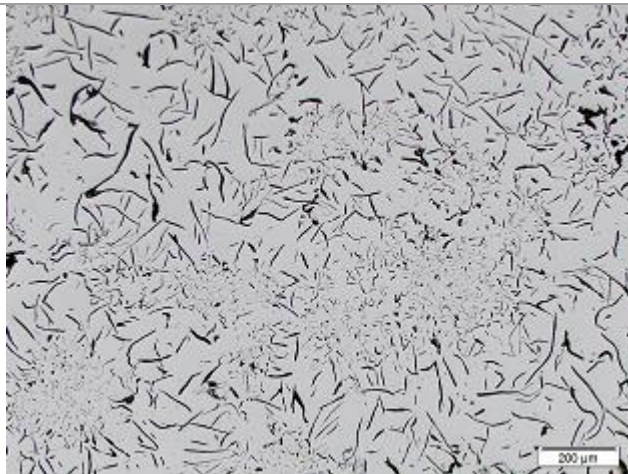
Matriz perlitica

Fundicion Gris con
500X

Matriz perlitica

PROBETA #2 : C-11.75-2

2.1 ANALISIS DE GRAFITO



Fundicion gris sin ataque 100X
tamaño #5 -tipo B

2.2 ANALISIS METALOGRAFICO MATRIZ



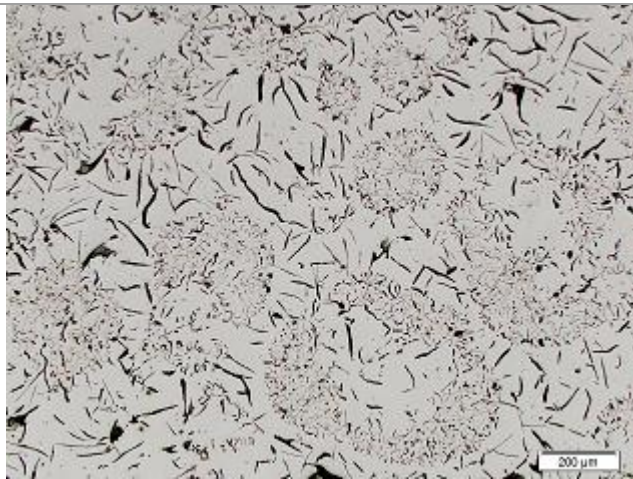
Fundición gris con ataque
500X
Matriz perlítica



Fundición gris con ataque
1000X
Matriz perlítica

PROBETA #3 : C-11.75-3

3.1 ANALISIS DE GRAFITO



fundicion gris sin ataque 100X
tamaño #4 -tipo B

3.2 ANALISIS METALOGRAFICO MATRIZ



fundicion gris con ataque
ataque

500X

Matriz perlítica



fundicion gris con

1000X

Matriz perlítica

PROBETA #4 : C-11.75-4

4.1 ANALISIS DE GRAFITO



Fundicion gris sin ataque 100X
tamaño#4 -tipo B

4.2 ANALISIS METALOGRAFICO MATRIZ

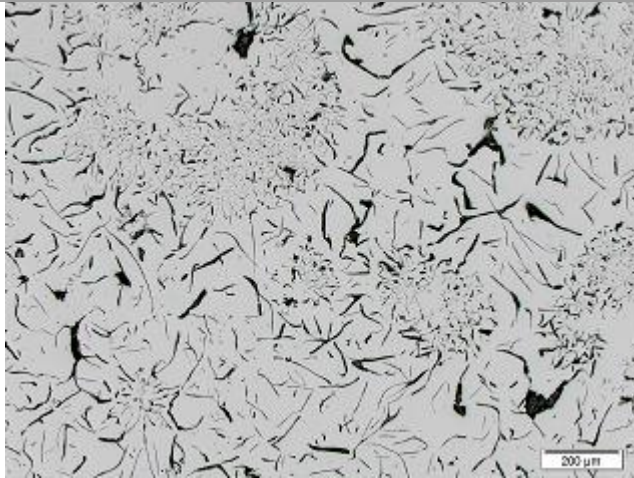


Fundicion gris con ataque
500X
Matriz perlítica



Fundicion gris con ataque
1000X
Matriz perlítica

PROBETA #5 : C-11.75-5
5.1 ANALISIS DE GRAFITO



Fundición gris sin ataque 100X
tamaño#4-tipo B

5.2 ANALISIS METALOGRAFICO MATRIZ



Fundicion gris con ataque
ataque

500X

Matriz perlítica



Fundicion gris con

1000X

Matriz perlítica

PROBETA #6 : C-11.75-6

6.1 ANALISIS DE GRAFITO



Fundicion gris sin ataque 100X
tamaño#4-tipo B

6.2 ANALISIS METALOGRAFICO MATRIZ



Fundicion gris con ataque
ataque

500X

Matriz perlitica

Fundicion gris con

1000X

Matriz perlitica

CONCLUSIONES:

NUMERO	PROBETA	TIPO DE GRAFITO	TAMANO	MATRIZ
1	C-11.75-1	B	4	PERLITICA
2	C-11.75-1	B	4	PERLITICA
3	C-11.75-1	B	4	PERLITICA

4	C-11.75-1	B	4	PERLITICA
5	C-11.75-1	B	5	PERLITICA
6	C-11.75-1			
NORMA		GRIS LAMINAR TIPO A Y B	4-8	PERLITICA

Equipo utilizado: microscopio metalográfico METAM

OBSERVACIONES:

ELABORADO POR:



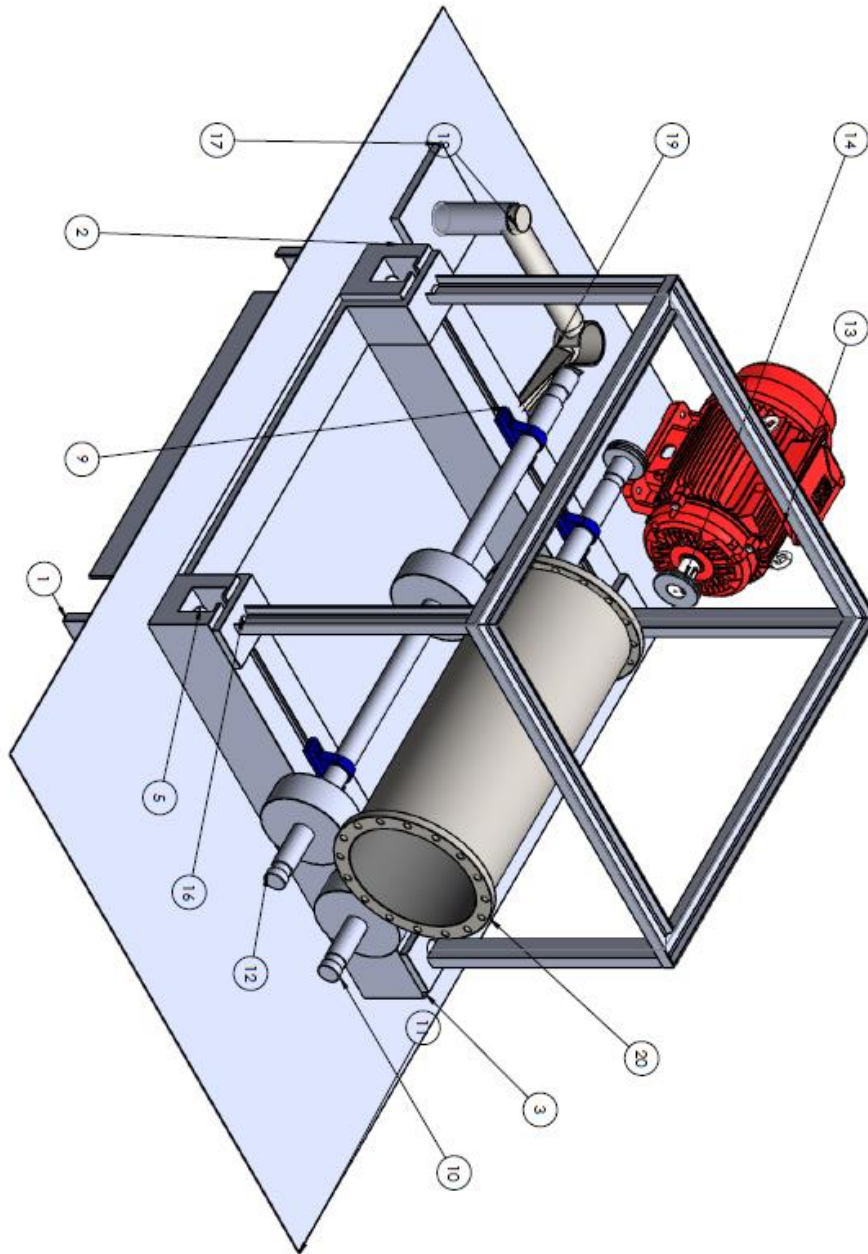
FABIO ALBERTO GARZON

Ing. FABIO ALBERTO GARZON GALVIS

Laboratorio Metalográfico

Anexo B

Se Adjuntan los Planos de la Maquina



Anexo C

Se adjuntan la solicitud del registro de productor nacional



DOCTOR(A):

JORGE WILLIAM PEREZ DALLOS
Representante Legal
DE WILLIAMS SERVICIOS PARA LA INDUSTRIA
CARRERA 33 # 59-92 TELEFONO 6223190

Asunto:
Registro de Productor de Bienes Nacionales

En atención a su solicitud me permito informarle que para registrar el(los) siguiente(s) producto(s):
INTRODUCCION DE CAMISA EN FUNDICION CENTRIFUGADA SEGUN NORMA ASTM 48A A BLOQUE DE
CILINDRO

Se requiere el diligenciamiento de un nuevo formulario teniendo en cuenta las correcciones que se especifican a continuación:

Por el estudio de su solicitud es importante enviar la lista del CKD por correo electrónico al funcionario encargado del estudio de su solicitud, verificar que los materiales nacionales relacionados estén inscritos ante el ministerio y en caso contrario debe anexar por el mismo medio una certificación del fabricante indicando la venta y fabricación del mismo por otra parte según conversación telefónica se debe programar visita industrial a sus instalaciones para la verificación del proceso, estándares de calidad y compra de materia prima para la fabricación del mismo.

Atentamente,

CESAR AUGUSTO OCHOA MORENO
GRUPO REGISTRO DE PRODUCTORES DE BIENES NACIONALES
Respuesta a Radicación No:

Anexo D

Se adjunta el manual de procesos

Manual de Operación del Sistema de Fundición Centrifuga para Geometrías Simétricas

Autor: Jorge Pérez Royero



De Williams Servicios para la Industria

Barrancabermeja


2015


La mayoría de los accidentes involucran la operación, mantenimiento y reparación de productos son causados por la inobservancia de básica reglas de seguridad o precauciones.

Los accidentes que normalmente podrán evitarse reconociendo potencialmente situaciones de peligro. Una persona debe estar alerta a los peligros potenciales.

Todas las personas deben tener la formación necesaria las habilidades y las herramientas para llevar a cabo estas funciones correctamente. La operación incorrecta, la falta lubricación y/o mantenimiento de este elemento puede ser peligrosa y podría causar lesiones

No utilice ni realice ninguna lubricación, mantenimiento o reparación en este producto, hasta que tenga leído y comprendido la operación, lubricación, mantenimiento e información de reparación.

	<p>DESCARGAS ELECTRICAS pueden causar la muerte.</p> <p>Tocar partes eléctricas vivas puede causar un shock total o serias quemaduras. El circuito que forman el electrodo y la pinza de tierra están eléctricamente vivas cuando la máquina es encendida. El circuito de conexión primaria a la máquina y las partes de la misma están también eléctricamente vivas cuando la máquina es encendida. En procesos de soldadura automáticos y semiautomáticos, el microalambre, los rodillos y guías de conducción, el alojamiento de los rodillos y todas las partes metálicas que tocan el microalambre están eléctricamente vivos o energizados. Una instalación incorrecta o un equipo mal aterrizado puede ser un riesgo. Siga las siguientes recomendaciones:</p> <ol style="list-style-type: none">1.- No toque partes eléctricamente vivas (energizadas).2.- Use siempre ropa seca, guantes en buenas condiciones y equipo de seguridad adecuado.3.- Aíslese usted mismo de la pieza de trabajo y tierra pisando en tapetes aislantes y secos.	<ol style="list-style-type: none">4.- Desconecte la máquina o pare el motor (en caso de máquinas impulsadas por motores de combustión) antes de instalarlas ó dar mantenimiento.5.- Instale y aterrice la máquina adecuadamente de acuerdo a este manual o bien de acuerdo a los códigos eléctricos nacionales, estatales o locales.6.- Apague el equipo cuando no esté en uso.7.- Nunca utilice cables rotos, dañados, mal empalmados o de un tamaño no recomendado.8.- No enrolle cables alrededor de un cuerpo.9.- La pieza de trabajo debe tener una buena conexión a tierra.10.- No toque el electrodo mientras este en contacto con la pieza de tierra.11.- Use únicamente máquinas que estén en buenas condiciones de operación de operación. Cambie o repare piezas dañadas inmediata mente.12.- Cuando trabaje a niveles arriba del piso utilice arneses de seguridad para prevenir caídas.13.- Mantenga las cubiertas de las máquinas en su lugar y atornille adecuadamente.
---	---	---

	<p>LAS PARTES EN MOVIMIENTO pueden causar accidentes.</p> <p>Las partes en movimiento como ventiladores, rotores y bandas pueden llegar a cortar dedos o incluso una mano o pueden atrapar ropa suelta. Observe estas recomendaciones:</p> <ol style="list-style-type: none">1.- Mantenga todas las puertas, paneles, cubiertas y guardas cerradas y aseguradas en su lugar.2.- Detenga la marcha del motor antes de hacer cualquier instalación o conexión.	<ol style="list-style-type: none">3.- Cuando tenga necesidad de quitar guardas, cubiertas, dar mantenimiento o reparar un equipo asegúrese de que sea hecho únicamente por personal calificado.4.- Para prevenir arranques accidentales del motor cuando se le este dando mantenimiento, desconecte el cable de la terminal negativa de la batería.5.- Mantenga las manos, cabello, ropa floja y herramientas alejadas de las partes en movimiento.6.- Reinstále los paneles o guardas y cierre las puertas cuando el servicio ha sido concluido y antes de arrancar el motor.
---	--	---

Contenido

1. Especificaciones	127
2. Montaje y desmontaje del Sistema	127
3. Procedimiento de Montaje	127
4. Variables de Control	127
6. Procedimiento de Trabajo	128
7. Procedimiento Post Proceso	129

Especificaciones

Carga Máxima: 800 Kg

Velocidad Máxima de Operación 1400 RPM

Diámetros de Moldes: 10" a 26,5"

Montaje y desmontaje del Sistema

El montaje comprende la ubicación del molde del cual se requiere general una pieza en fundición de Hierro Gris

- Los Diámetros Disponibles por este Sistema Llegan desde 10" Hasta 26,5"

Procedimiento de Montaje

- Verificación de los Sistemas de Sujeción de los Soportes
- Verificación del Sistema Motriz
- Montaje del molde
- Alistamiento de los Sistemas de Extracción

Variables de Control

La velocidad se debe de mantener en un rango, de Acuerdo al diámetro de Camisa que se desea obtener

Tabla 1. Determinación de la Velocidad de Rotación Máxima

Diámetro Interno	Velocidad de Rotación Máxima
0" – 5"	850 RPM
5" – 10"	723 RPM
10"- 15,5"	613 RPM

Fuente: Autor

1. Procedimiento de Operación

Luego de la Selección del Molde que se desea conformar, se debe ajustar a una distancia entre los rodillos de soporte

Se permite una distancia entre 5 a 10 cm por las condiciones del Vertedero

Luego de tener el Molde, soportado sobre la máquina. Se debe proceder con una serie de pasos de alistamiento

- preparar el molde de fundición con la mezcla antifricción y colocar a girar durante 3 minutos
- Verificar el correcto funcionamiento del vertedero, para la posterior fundición
- Preparar el Sistema Hidráulico de Extracción

Procedimiento de Trabajo

Para Efectos de este manual de procedimiento, se analizara el procedimiento de trabajo, unos momentos antes del vertimiento del material de fundición en el molde

- El Molde se debe encontrar girando a la Velocidad determinada, según las especificaciones del molde (ver Tabla 1).
- El Vertedero se debe encontrar alineado con el eje de rotación del molde
- Luego de la adicción del material el molde debe continuar girando por un espacio de 5 minutos, después de terminar de agregar el material
- Para la extracción de la camisa terminada del molde se requiere la Utilización de un Sistema Hidráulico.

- La Limpieza para la reutilización del molde es un paso requerido, para evitar que los siguientes moldes se queden atascados en el molde

Procedimiento Post Proceso

Luego de la extracción de la camisa se debe tener un enfriamiento natural, por un espacio aproximado de 4 a 6 horas para realizar las tareas de desbarbado y posterior maquinado de las camisas de Hierro gris

13. Bibliografía

- [1]. BERNARD J. Hamrock , Elementos de máquinas, INTERAMERICANA DE MEXICO, McGraw-Hill, 2000, 926 Paginas
- [2]. BRONCE, Anchor, Conclusiones de la Fundición Centrifuga, 2002, www.anchorbronze.com/centrifugalcast.htm [Consulta 12 de Diciembre 2014]
- [3]. Conclusiones de la Fundición Centrifuga, 2002, www.anchorbronze.com/centrifugalcast.htm [Consulta 12 de Diciembre 2014]
- [4]. Cockfield, Roger, Foro de Fundición Centrifuga, www.castcraft.com/centinf.htm [Consulta 12 de Diciembre 2014]
- [5]. DUBBEL, Heinrich, Manual del constructor de máquinas, Edición número 5, 1977, 1986 Paginas
- [6]. FRANK P. Incropera , Fundamentos de transferencia de calor , Pearson Educación, 1999, 886 Paginas
- [7]. Efundu, Rogert, Procesos Fundición Centrifuga www.efunda.com/processes/metal_processing/centri_casting.cfm [Consulta 13 de Diciembre de 2014]
- [8]. GOLDENS, Fundación Centrifuga, 2010, www.gfmco.com/centrifugal.htm [Consulta 12 de Diciembre 2014]
- [9]. SHIGLEY, Joseph Edward , Diseño en ingeniería mecánica, 8 Edición, McGraw-Hill, 1997, 915 Paginas
- [10]. SMITH, William, Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales, McGraw-Hill, 2006, 1015 Paginas
- [11]. SEROPE Kalpakjian, Manufactura, ingeniería y tecnología, Edición número 4, 2002, 1152 Paginas
- [12]. Fundación centrifuga Documentos, www.centrifugal.net, [Consulta 14 de Diciembre de 2014]

[13]. YUNUS A. Çengel, Mecánica de Fluidos, McGraw-Hill,2008, 846
Paginas.