



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

REDISEÑO Y CONTRUCCIÓN DE LA MÁQUINA DE COLADO CENTRÍFUGO HORIZONTAL

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO

ANDRADE BEDOYA JEAN PAÚL

jean.andrade@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. FAUSTO HERNÁN OVIEDO FIERRO, M.Sc.

fausto.oviedo@epn.edu.ec

CODIRECTOR: ING. MARIO GERMÁN GRANJA RAMÍREZ, M.Sc.

mario.granja@epn.edu.ec

Quito, Octubre 2020

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **Jean Paúl Andrade Bedoya**, bajo mi supervisión.

Ing. Fausto Hernán Oviedo Fierro

DIRECTOR DEL PROYECTO

Ing. Mario Germán Granja Ramírez

CODIRECTOR DEL PROYECTO

DECLARACIÓN

Yo, **Jean Paúl Andrade Bedoya**, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Jean Paúl Andrade Bedoya

DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación va dedicado infinitamente a mis padres Cecy y Jean, pieza fundamental de mi formación personal y académica, que gracias a su gran esfuerzo he logrado cumplir esta gran meta.

A mis abuelitos Rosita (+), Emithcita, Rene y Huguito por acogerme con mucho cariño y siempre alentarme a ser mejor persona y superarme cada día más.

A mis primos Gabriel y Andrés, a mis tíos y a toda mi familia por apoyarme y nunca dejarme solo.

A mis amigos Paúl y Hugo por brindarme su amistad sincera y siempre apoyarme en mi vida personal y académica.

Y de manera muy especial a mis hermanas Karen y Emily que siempre creyeron en mí, este trabajo es por y para ustedes. Les amo mucho.

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a Dios por siempre cuidarme, darme salud y la fortaleza necesaria para lograr cumplir este gran objetivo.

Agradezco a la Escuela Politécnica Nacional, a los ingenieros Fausto Oviedo y Mario Granja, por compartirme su conocimiento a lo largo de la carrera y por ser mis directores en este trabajo de titulación; al tecnólogo Fabián Peñaloza por su colaboración durante todo el proceso de fundición.

A mi primo Gabriel por su gran ayuda durante la construcción de este proyecto.

A mis padres, a mis hermanas y a toda mi familia por siempre apoyarme y alentarme a lograr alcanzar esta meta.

ÍNDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos.....	2
Alcance	2
1. MARCO TEÓRICO	3
1.1. ¿Qué es Fundición?.....	3
1.1.1. Proceso de Fundición.....	3
1.1.2. Fundiciones de Aluminio	4
1.2. Fundición en molde permanente	5
1.3. Fundición centrífuga	5
1.3.1. Fundición centrífuga real.....	6
1.3.2. Fundición semicentrífuga	7
1.3.3. Fundición centrifugada	8
1.4. Antecedentes de fundición centrífuga en el Ecuador	8
1.5. Máquinas para fundición centrífuga	9
1.6. Sistemas de transmisión de movimiento.....	10
1.7. Ensayos no destructivos.....	15
1.7.1. Inspección visual (VT)	15
1.7.2. Líquidos penetrantes (PT).....	18
2. METODOLOGÍA.....	20
2.1. Diseño conceptual y teórico de la máquina de colado centrífugo horizontal .	21
2.1.1. Sistemas y subsistemas deficientes	22
2.1.2. Planteamiento y selección de alternativas de solución	23
2.1.3. Subsistema 1: Transmisión eje – molde.....	24
2.1.4. Subsistema 2: Apoyo del Molde.....	26
2.1.5. Subsistema 3: Motor.....	28
2.1.6. Matriz Morfológica	28

2.1.7.	Selección de alternativa de solución mediante el método ordinal de criterios ponderados.....	29
2.1.8.	Rediseño del sistema de transmisión de la máquina de colado centrífugo horizontal.....	32
2.1.9.	Molde	34
2.1.10.	Diseño del Eje Conductor	39
2.1.11.	Cálculo de rodamientos para el soporte del eje conductor.....	61
2.1.12.	Diseño de Rodetes Conductores.....	63
2.1.13.	Diseño de Rodetes Conducidos	64
2.1.14.	Diseño del sistema guiador	69
2.2.	Ensamblaje de nuevos elementos mecánicos	72
2.2.1.	Ensamblaje del molde y sus componentes	72
2.2.2.	Ensamblaje del eje conductor	75
2.2.3.	Ensamblaje del sistema de rodets conducidos.....	76
2.2.4.	Ensamblaje del sistema guiador	76
2.3.	Materiales y equipos utilizados para la fundición de tubo de aluminio.....	77
2.3.1.	Materia Prima	77
2.3.2.	Fundente.....	78
2.3.3.	Desgasificante	78
2.3.4.	Antiadherente para el molde	78
2.3.5.	Horno de crisol a gas.....	79
2.3.6.	Tacómetro Digital	79
2.3.7.	Multímetro y Termocupla.....	80
2.3.8.	Pirómetro	81
2.3.9.	Máquina de colado centrífugo horizontal	81
2.4.	Parámetros de Funcionamiento.	82
2.5.	Preparación y puesta en marcha de la máquina de colado centrífugo horizontal.	83
2.5.1.	Preparación de la máquina de colado centrífugo horizontal	83
2.5.2.	Puesta en marcha de la máquina de colado centrífugo horizontal	83

2.6.	Aplicación de Ensayos No Destructivos.....	84
2.6.1.	Inspección Visual (VT).....	84
2.6.2.	Líquidos Penetrantes (PT)	85
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	86
3.1.	Fundición de prueba	86
3.2.	Resultados obtenidos en los Ensayos No Destructivos	88
3.2.1.	Resultados del ensayo de inspección visual (VT)	88
3.2.2.	Resultados del ensayo de líquidos penetrantes (PT).....	96
3.3.	Análisis de resultados.....	100
3.3.1.	Análisis del ensayo de inspección visual (VT).....	101
3.3.2.	Análisis del ensayo de líquidos penetrantes.....	102
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	103
4.1.	Conclusiones.....	103
4.2.	Recomendaciones	104

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Cantidad de iluminación ambiental y local según el tipo de trabajo.	16
Tabla 2.1. Matriz morfológica.	28
Tabla 2.2. Valor específico de cada criterio.	30
Tabla 2.3. Valor específico para el criterio transmisión.	31
Tabla 2.4. Valor específico para el criterio montaje.	31
Tabla 2.5. Valor específico para el criterio regulación.	31
Tabla 2.6. Valor específico para el criterio precio.	31
Tabla 2.7. Resultados del método ordinal de criterios ponderados.	32
Tabla 2.8. Parámetros de funcionamiento óptimos de la máquina de colado centrífugo horizontal.	33
Tabla 2.9. Características y dimensiones del molde	34
Tabla 2.10. Propiedades Físicas Acero A36	34
Tabla 2.11. Resultados de análisis en SolidWorks sobre la pista del molde.	37
Tabla 2.12. Dimensiones de tubería de aluminio a obtener	38
Tabla 2.13. Coeficientes de resistencia para acero inoxidable.	54
Tabla 2.14. Factores a y b para cálculo de ka	54
Tabla 2.15. Valores de ST/SRT , según la temperatura de funcionamiento.	55
Tabla 2.16. Estimaciones de primera iteración de los factores de concentración del esfuerzo Kt	58
Tabla 2.17. Resultados simulación del rodete conductor.	64
Tabla 2.18. Resultados simulación del pasador del rodete conducido.	66
Tabla 2.19. Resultados simulación de la estructura del rodete conducido.	67
Tabla 2.20. Parámetros de funcionamiento óptimos de la máquina de colado centrífugo horizontal.	82
Tabla 3.1. Defectos en la tubería P3.	90
Tabla 3.2. Defectos en la tubería P3.	92
Tabla 3.3. Defectos en la tubería P5.	95
Tabla 3.4. Defectos en la tubería P1.	97

Tabla 3.5. Defectos en la tubería P3.	98
Tabla 3.6. Defectos en la tubería P5.	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Tipos de molde por su forma.	4
Figura 1.2. Molde permanente metálico.	5
Figura 1.3. Sistema de fundición centrífuga horizontal.	6
Figura 1.4. Sistema de fundición centrífuga vertical.	7
Figura 1.5. Molde de fundición centrífuga.	8
Figura 1.6. Máquina de fundición centrífuga vertical.	9
Figura 1.7. Máquina de fundición centrífuga horizontal.	10
Figura 1.8. Sistema de ruedas de fricción.	11
Figura 1.9. Sistema de poleas con banda.	11
Figura 1.10. Tren de poleas con banda.	12
Figura 1.11. Tipos de correas.	13
Figura 1.12. Tipos de engranajes.	13
Figura 1.13. Sistema de tornillo sin fin.	14
Figura 1.14. Sistema de engranajes con cadena.	15
Figura 1.15. Proceso para aplicar líquidos penetrantes.	20
Figura 2.1. Sistema existente.	21
Figura 2.2. Engrane con falla por fatiga.	22
Figura 2.3. Chumaceras industriales con rodamientos de rodillos cónicos.	23
Figura 2.4. Transmisión de movimiento por ruedas dentadas.	24
Figura 2.5. Transmisión de movimiento por rodetes conductores y conducidos.	25
Figura 2.6. Transmisión de movimiento por 6 rodetes.	26
Figura 2.7. Apoyo del molde en chumaceras.	26
Figura 2.8. Apoyo del molde en rodetes con palanca superior.	27
Figura 2.9. Apoyo del molde en 6 rodetes acoplados a 2 ejes.	27
Figura 2.10. Motor eléctrico.	28
Figura 2.11. Sistema de transmisión propuesto.	33
Figura 2.12. Molde sin modificaciones.	35
Figura 2.13. Pistas del molde.	35

Figura 2.14. Molde con pistas.	36
Figura 2.15. Distribución de esfuerzos sobre la pista del molde.....	36
Figura 2.16. Molde sobre rodetes.	37
Figura 2.17. Velocidades angulares en la máquina de colado centrífugo horizontal. ...	38
Figura 2.18. Análisis de cargas en el sistema molde - rodetes.....	40
Figura 2.19. Descomposición de la fuerza F.	41
Figura 2.20. Descomposición de la fuerza F.	42
Figura 2.21. Diagrama de cuerpo libre del eje conductor.	46
Figura 2.22. Diagrama de cuerpo libre de la sección A-C del eje conductor.....	48
Figura 2.23. Diagrama de cuerpo libre de la sección C-F del eje conductor.	48
Figura 2.24. Diagrama de cuerpo libre en el plano X-Y de la sección A-C del eje conductor.	50
Figura 2.25. Diagrama de cuerpo libre de la sección A-F del eje conductor.	57
Figura 2.26. Diagrama de sensibilidad a la muesca q vs radio de la muesca r	59
Figura 2.27. Diagrama de sensibilidad a la muesca $q_{cortante}$ vs radio de la muesca r	60
Figura 2.28. Distribución del esfuerzo y deformación del rodetes conductor.	64
Figura 2.29. Sistema rodetes conducido.	65
Figura 2.30. Distribución de fuerzas en pasador del rodetes conducido.....	65
Figura 2.31. Distribución del esfuerzo y deformación del pasador del rodetes conducido.	66
Figura 2.32. Distribución de fuerzas en la estructura del rodetes conducido.	67
Figura 2.33. Distribución del esfuerzo y deformación de la estructura del rodetes conducido.	67
Figura 2.34. Catálogo rodamientos SKF.....	68
Figura 2.35. Sistema guiador.	69
Figura 2.36. Despiece del sistema guiador.	69
Figura 2.37. Vista interior del sistema guiador.	70
Figura 2.38. Catálogo rodamientos SKF.....	71
Figura 2.39. Nuevo diseño de la máquina de colado centrífugo horizontal.	72

Figura 2.40. Estado inicial del Molde de la máquina de colado centrífugo horizontal. .	73
Figura 2.41. Torneado del molde de la máquina de colado centrífugo horizontal.	73
Figura 2.42. Proceso de cilindrado interno para obtención de pistas del molde.	74
Figura 2.43. Molde y pistas ensambladas.	74
Figura 2.44. Eje antiguo con cambio de sección.	75
Figura 2.45. Elementos anclados al eje.	75
Figura 2.46. a) Sistema de rodamiento, b) Sistema Rodete Conducido.	76
Figura 2.47. Proceso de corte por hilo.	76
Figura 2.48. a) Elementos del sistema guiador. b) Rodete superior.	77
Figura 2.49. Chatarra de aluminio utilizada para fundir tubos de aluminio.	78
Figura 2.50. Horno de crisol a gas.	79
Figura 2.51. Tacómetro digital.	79
Figura 2.52. Multímetro digital.	80
Figura 2.53. Pirómetro IRT206.	81
Figura 2.54. Máquina de colado centrífugo horizontal.	82
Figura 2.55. Esquema de división de tuberías para inspección visual.	85
Figura 3.1. Tubería obtenida por colado centrífugo.	87
Figura 3.2. Superficie interior de la tubería obtenida por colado centrífugo.	87
Figura 3.3. Inspección visual de la sección A de la tubería P1.	88
Figura 3.4. Inspección visual de la sección B de la tubería P1.	89
Figura 3.5. Inspección visual de la sección C de la tubería P1.	89
Figura 3.6. Inspección visual de la sección A de la tubería P3.	91
Figura 3.7. Inspección visual de la sección B de la tubería P3.	91
Figura 3.8. Inspección visual de la sección C de la tubería P3.	92
Figura 3.9. Inspección visual de la sección A de la tubería P5.	93
Figura 3.10. Inspección visual de la sección B de la tubería P5.	94
Figura 3.11. Inspección visual de la sección C de la tubería P5.	94
Figura 3.12. Ensayo de líquidos penetrantes en la tubería P1.	96
Figura 3.13. Ensayo de líquidos penetrantes en la tubería P1.	96

Figura 3.14. Ensayo de líquidos penetrantes en la tubería P3.	97
Figura 3.15. Ensayo de líquidos penetrantes en la tubería P3.	98
Figura 3.16. Ensayo de líquidos penetrantes en la tubería P3.	98
Figura 3.17. Ensayo de líquidos penetrantes en la tubería P5.	99
Figura 3.18. Ensayo de líquidos penetrantes en la tubería P5.	100

RESUMEN

En el presente documento se detalla el rediseño y construcción de la máquina coladora centrífuga horizontal del Laboratorio de Fundición de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional. Se procedió a determinar el estado actual de la máquina, identificando las razones y factores por los cuales presenta deficiencias y no es utilizada para la fabricación de tubos de aluminio objetivo principal para la que fue construida. Se realizó el rediseño mecánico de la máquina, planteando las posibles alternativas de solución a los subsistemas deteriorados. Con la ayuda de la matriz de criterios ponderados se obtuvo la alternativa que mejor satisface las necesidades presentadas la cual posteriormente se diseñó, calculó y construyó. Cambiando de esta manera el sistema de transmisión de la máquina, el sistema de soporte del molde y añadiendo un soporte superior amortiguado al molde. Finalmente se realizaron pruebas a la máquina constatando la calidad de las tuberías obtenidas mediante los ensayos no destructivos de inspección visual y tintas penetrantes.

Palabras clave: Centrífuga, fundición, transmisión, calidad, ensayo.

ABSTRACT

This document covers the redesign and the construction process of a horizontal centrifugal casting machine owned by the Casting Lab from the Mechanical Engineering College part of the National Polytechnic School in Ecuador. The device's current state was determined by identifying the reasons and factors that have caused current deficiencies that do not allow its use and to fulfill the purpose for which it was built. As a result, a mechanical redesign of the machinery was performed, setting possible alternatives to fix the deteriorated systems. With the help of a weighted criteria matrix, the best alternative was chosen, followed by its implementation through detailed design, calculation, and construction. The final redesign included a new transmission system and added a superior mold support suspension mechanism. Finally, the pipes' quality was evaluated using two non-destructive tests (NDT), visual inspection, and dye penetrant testing.

Keywords: Centrifuge, casting, transmission, quality, test.

REDISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA MÁQUINA DE COLADO CENTRÍFUGO HORIZONTAL

INTRODUCCIÓN

El presente proyecto tiene por objetivo recuperar la máquina de colado centrífugo horizontal del laboratorio de fundición de la Escuela Politécnica Nacional, implementando un rediseño completo en la misma, el cual nos permitirá corregir errores detectados en su funcionamiento y así habilitarla para trabajar en ella en actividades de carácter académico.

El diseño y la construcción de la máquina de colado centrífugo horizontal se lo realizó en el año 2012 en el trabajo de titulación llamado “Obtención de Tubos sin costura por el proceso de colado por centrifugado horizontal” [1] en el cual se realizó el diseño y la construcción de la máquina con fines educativos e investigativos, constatando que el objetivo para la cual fue construida fue cumplido, posteriormente en el 2017 en el trabajo de titulación llamado “Estudio Paramétrico del proceso de colado centrífugo horizontal para la obtención de tubos de aluminio sin costura” [2], se obtuvieron los parámetros óptimos de funcionamiento de la misma para la obtención de tubos de aluminio el cuál fue favorable eliminando de esta manera los defectos de fundición que aparecían en los tubos, pero a su vez surgieron varios problemas adicionales que tornaron inoperable la máquina, problemas que serán abordados y solucionados en el rediseño presentado en el este proyecto.

El primer capítulo se centra en un resumen de la información teórica necesaria para entender el principio de funcionamiento de la máquina coladora centrífuga horizontal, así como también antecedentes sobre la fundición centrífuga en el Ecuador, tipos de máquinas centrífugas, y una breve descripción de los ensayos no destructivos que se realizarán a las tuberías de aluminio que serán el producto final de la máquina.

Después, en el segundo capítulo se detalla minuciosamente el proceso de rediseño conceptual y teórico de los subsistemas que presentan daño y causan que la máquina de colado centrífugo no funcione correctamente, así como también las características de los nuevos elementos de máquina y los parámetros de funcionamiento que estos tendrán, concluyendo con la preparación y puesta en marcha de la máquina y la aplicación de los ensayos no destructivos de inspección visual y líquidos penetrantes.

Posteriormente en el tercer capítulo se analiza los resultados obtenidos de la máquina coladora centrífuga, estos resultados son en su mayoría verificaciones del correcto funcionamiento de los nuevos componentes con fundiciones de prueba y con una simulación por elementos finitos en el software SolidWorks 2018 así como también el resultado del análisis de ensayos no destructivos realizado por el laboratorio de ENDS en la Escuela Politécnica Nacional.

Y finalmente en el cuarto capítulo se presenta las conclusiones y recomendaciones del proyecto.

Objetivo general

Rediseñar y construir la máquina de colado centrífugo horizontal.

Objetivos específicos

- Determinar las especificaciones técnicas de la máquina de colado centrífugo horizontal.
- Elaborar los planos de conjunto, subconjunto y de detalle de la máquina de colado centrífugo horizontal.
- Instalar y ensamblar las partes calculadas en el rediseño de la máquina de colado centrífugo horizontal.
- Establecer los parámetros de funcionamiento óptimos de la máquina para obtener tubos de aluminio sin costura de buena calidad.
- Realizar pruebas de funcionamiento a la máquina de colado centrífugo horizontal y garantizar la calidad superficial de los tubos de aluminio mediante la aplicación de ensayos no destructivos de inspección visual y líquidos penetrantes.

Alcance

Este proyecto tiene como objetivo el rediseño y la construcción de la máquina de colado centrífugo horizontal del Laboratorio de Fundición de la Facultad de Ingeniería Mecánica para de esta manera solucionar todos los problemas presentados en su funcionamiento, lo cual la han hecho inoperable.

El proyecto abarca las siguientes actividades:

- Determinar el estado actual de la máquina identificando sus principales problemas y causas.

- Estudiar las posibles alternativas de solución en el rediseño de la máquina, principalmente de los subsistemas en los cuales se presentan problemas y seleccionar la alternativa adecuada mediante la matriz de criterios ponderados.
- Instalar y ensamblar las partes calculadas, para posteriormente realizar pruebas de funcionamiento de la máquina de colado centrifugo horizontal.
- Realizar los ensayos no destructivos de inspección visual y líquidos penetrantes a los tubos de aluminio para constatar su calidad superficial.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. ¿Qué es Fundición?

Se conoce a la fundición como el cambio que tiene un metal en estado sólido a estado líquido, utilizando un medio que entregue energía al metal, en este caso el aumento de energía se traduce en el incremento de temperatura por encima de la temperatura de fusión, causando así la transformación del metal a estado líquido. Al metal en estado líquido se lo conoce como colada, que posteriormente va a ser vertida mediante la fuerza de gravedad u otra fuerza en un molde el cual es previamente calculado y fabricado, el mismo que cuenta con las características de la pieza que se desea obtener, posteriormente se necesita dejar al molde reposar durante un tiempo determinado, el cual es llamado tiempo de solidificación, para que la colada pueda adaptar la forma del molde y finalmente extraer la pieza.

1.1.1. Proceso de Fundición

Para poder entender en que consiste el proceso de fundición es necesario conocer el significado de algunos términos:

El molde es uno de los principales elementos y es aquel que en su interior tiene una cámara la cual da la forma de la pieza deseada. El metal al momento que empieza a disminuir su temperatura tiende a contraerse, es por ello por lo que esta cámara debe ser calculada previamente a su construcción tomando en cuenta este factor.

Como se explicó, el primer paso para realizar una fundición es llevar al metal hasta una temperatura mayor a su punto de fusión, para que posteriormente ya en estado líquido se lo vierta en el molde. Existen dos tipos de molde de acuerdo con su forma como se muestra en la figura 1.1, estos son: molde abierto el cual lleva este nombre debido a que se vierte el metal solamente hasta que se llene la cámara que no es cubierta; y el

molde cerrado, que por lejos es el más utilizado en la fundición actual, el cual cuenta con un sistema un poco más complejo llamado sistema de paso. Siguiendo con el proceso de fundición, una vez vertido el metal líquido en el molde se procede a esperar a que éste empiece a enfriarse y solidificarse, llevando a cabo un cambio de fase líquida a sólida, en la cual el metal adopta la forma de la cámara del molde y en donde adquiere sus propiedades mecánicas. Después se procede a retirar la pieza del molde y finalmente de ser el caso se realizan actividades adicionales las cuales pueden ser: efectuar una limpieza adecuada, retirar excesos de material o dar tratamientos térmicos para mejorar sus propiedades si es lo que se desea.

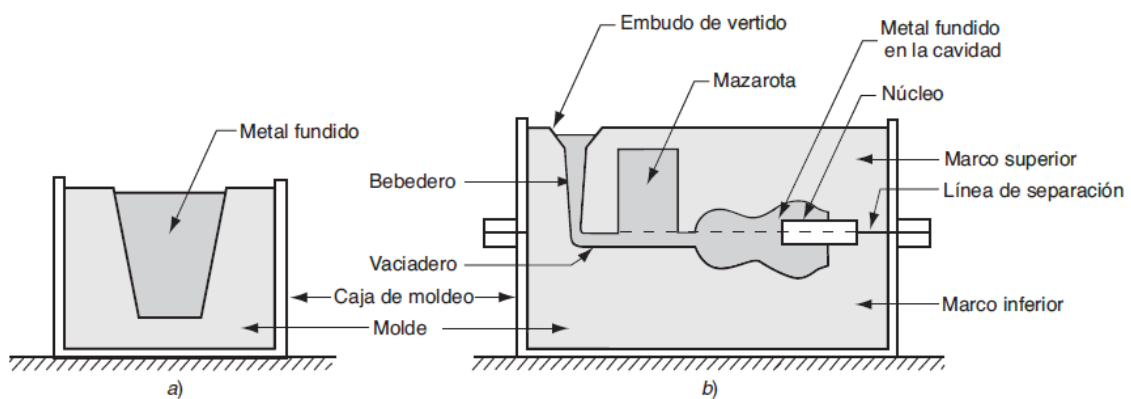


Figura 1.1. Tipos de molde por su forma. a) Molde abierto, b) Molde cerrado. [3]

Podemos dividir los procesos de fundición de acuerdo con el tipo de molde que se utilice, estos son: fundición con molde desechable y fundición con molde permanente. En el presente documento abordaremos con mayor énfasis a la fundición con molde permanente ya que es pertinente para el desarrollo de este proyecto.

1.1.2. Fundiciones de Aluminio

Para realizar una fundición de aluminio es importante conocer qué tipo de aleación se va a usar, ya que dependiendo de ello se van a tener propiedades mecánicas diferentes en la fundición final. Las aleaciones más comunes utilizadas en la fundición son las cuales tiene como elementos aleantes el silicio y el cobre.

Las principales propiedades obtenidas de una fundición de aluminio son las siguientes:

- Gran facilidad para el mecanizado haciendo de esta manera que el costo de este sea bajo.
- Resistencia a la fatiga elevada.

- Se alcanza una alta precisión en cuanto a las dimensiones deseadas de la fundición haciendo de esta manera que el trabajo posterior a la fundición sea mínimo.

1.2. Fundición en molde permanente

La fundición en molde permanente es aquella que utiliza por reiteradas ocasiones un mismo molde, por lo general hecho de metal o de algún material cerámico refractario tal y como se muestra en la figura 1.2, el cual debe soportar altas temperaturas. Este tipo de molde es de un costo mucho más elevado que un molde común de arena, y como ventaja se tiene que este molde es ideal para fundir piezas en serie ya que gracias a este molde se obtienen piezas mucho más rápido y con una buena calidad. [4]

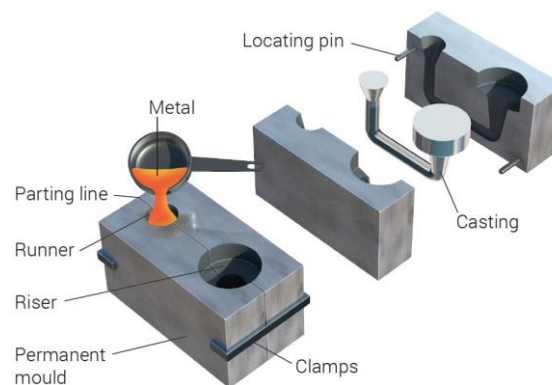


Figura 1.2. Molde permanente metálico.

Fuente: <https://cutt.ly/irSLrJw>

Es aconsejable que, para el uso adecuado de moldes permanentes por reiteradas ocasiones, se debe recubrir el interior con grafito, ya que este es un elemento que sirve como una película térmica, para de esta manera poder tener controlado el enfriamiento uniforme de la fundición. Además, los moldes permanentes deben precalentarse a una temperatura cercana a los 200°C para que no existan problemas al verter la colada en el mismo y de esta manera disminuir el impacto térmico en las cavidades internas. [5]

1.3. Fundición centrífuga

La fundición centrífuga es un proceso de fundición en la cual un molde gira a determinada velocidad haciendo que la fuerza centrífuga generada despliegue el metal fundido hacia las paredes externas de la cámara del molde permanente. Este tipo de

fundición es ideal para piezas en las que la parte interior de la misma es circular, un ejemplo de ello son tuberías, anillos, entre otros.

La fuerza centrífuga es una fuerza “ficticia” por así decirlo, que se genera por inercia cuando se le aplica un movimiento circular a cualquier objeto, la cual tiende a escapar del centro de giro. Se dice que esta fuerza es ficticia debido a que es utilizada junto a la fuerza centrípeta para explicar los movimientos circulares y las fuerzas que se general a partir de este movimiento. [6]

Podemos clasificar la fundición centrífuga en 3 tipos:

- Fundición centrífuga real.
- Fundición semicentrífuga.
- Fundición centrifugada.

1.3.1. Fundición centrífuga real

La fundición centrífuga real es aquella en la que el eje de rotación del molde es el mismo eje de rotación que el de la fundición el cual puede estar dispuesto de forma horizontal o vertical.

La fundición centrífuga horizontal se la utiliza cuando se desea obtener piezas con una superficie interior totalmente circular, en la figura 1.3 podemos observar la disposición general de un sistema de fundición centrífuga horizontal. Por otro lado, la fundición centrífuga vertical al tener la acción de la fuerza de gravedad por lo general hace que la superficie inferior de la pieza a obtener sea más gruesa que la superior, haciendo que se tenga una forma parabólica. [3]

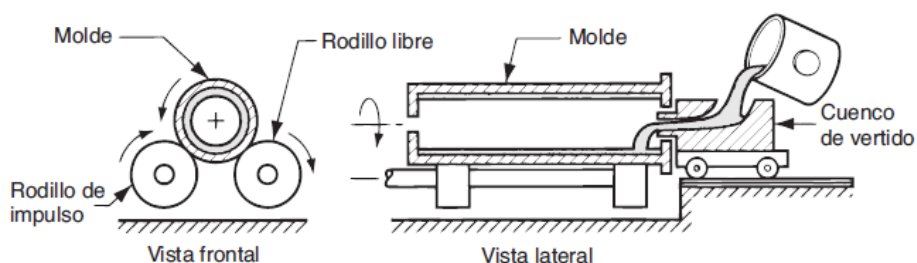


Figura 1.3. Sistema de fundición centrífuga horizontal. [3]

El principio de funcionamiento de la fundición centrífuga real es el siguiente: Ésta se lleva a cabo vertiendo el metal fundido en un molde giratorio, el cual puede estar dispuesto horizontal o verticalmente. El molde debe ser precalentado a cierta temperatura, para que al verter el metal fundido no exista un cambio brusco de

temperatura y no exista una solidificación prematura en las paredes del molde y no se llegue a formar la pieza de forma uniforme. El molde debe girar a una velocidad determinada la cual es controlada por un motor, haciendo que el metal fundido gire alrededor de su eje central. De esta manera, el metal fundido vertido se arroja a las paredes del molde extendiéndose uniformemente a las paredes, creando una forma cilíndrica. Finalmente se vierte más metal fundido hasta obtener el tamaño y la forma de la pieza deseada.

En este tipo de fundición ambos extremos del molde son sellados con tapas macho que su función principal es que el metal fundido no sea expulsado hacia el exterior mientras se realiza el proceso de fundición. Mediante este método se fabrican tuberías, bujes, etc.

1.3.2. Fundición semicentrífuga

Este proceso de fundición a diferencia de la fundición centrífuga real es utilizado para producir fundiciones sólidas y de un mayor tamaño y no fundiciones cilíndricas como tuberías. Estas fundiciones por lo general son engranajes o ruedas metálicas.

En la fundición semicentrífuga se utiliza un molde dispuesto verticalmente, el cual mientras gira recibe el metal fundido mediante un canal de colado formando de esta manera la fundición deseada. En la figura 1.4 se muestra un ejemplo de la disposición del molde de manera vertical y el canal de colado necesario para verter el metal fundido.

Una característica particular de este proceso de fundición es que la velocidad de rotación del molde es mucho menor que el proceso de fundición centrífuga real siendo de 180 a 200 revoluciones por minuto y debido a esto la fundición es menos densa y las impurezas no son distribuidas uniformemente en el centro de la fundición.[7]

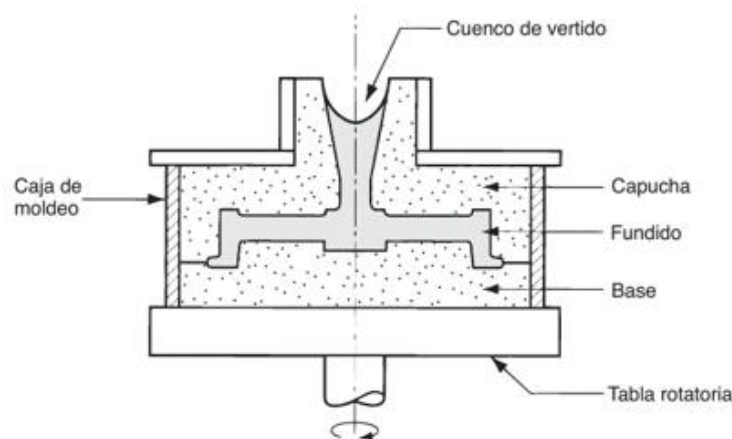


Figura 1.4. Sistema de fundición centrífuga vertical.[3]

1.3.3. Fundición centrífuga

La fundición centrífuga consiste en una serie de cavidades dispuestas simétricamente cerca del borde del molde e interconectadas mediante un canal de alimentación el cual transmitirá la colada hacia ellas mediante la fuerza centrífuga generada. Este proceso se utiliza para fundir piezas de pequeña dimensión, la velocidad de rotación es más rápida que la fundición semicentrífuga y puede llegar a alcanzar las 400 revoluciones por minuto y es ideal para la producción de varias piezas a la vez como se muestra a continuación en la figura 1.5.



Figura 1.5. Molde de fundición centrífuga.

Fuente: <https://bit.ly/33ESu45>

1.4. Antecedentes de fundición centrífuga en el Ecuador

En el Ecuador el avance de la fundición centrífuga es casi nula, actualmente las máquinas coladoras centrífugas son desarrolladas principalmente como proyectos de tesis en las diferentes universidades del país, y éstas son utilizadas netamente para demostrar que es posible la creación de diferentes piezas mediante este método mas no para producirlas en serie. Un ejemplo de ello es que, en la Escuela Politécnica Nacional en el año de 2009, se desarrolló el “diseño y construcción de un equipo de laboratorio para colado vertical” para obtener volantes realizada por los ingenieros Boada y Rodríguez, dirigida por el Doctor Víctor Cárdenas el cual sirvió como guía para los futuros proyectos concernientes a la fundición centrífuga, así mismo en la Escuela Superior Politécnica del Litoral en el año 2009, se desarrolló una máquina coladora centrífuga para formar barras de aleaciones especiales aplicando normas ASTM. [8]

1.5. Máquinas para fundición centrífuga

Existen diferentes tipos de máquinas para fundición centrífuga, las principales son las siguientes:

- Máquinas centrífugas verticales.
- Máquinas centrífugas horizontales.

1.5.1. Máquinas centrífugas verticales

Las máquinas de fundición centrífuga verticales son capaces de formar piezas en las que se tiene una menor altura que el diámetro. Una de las principales ventajas es que casi cualquier tamaño y forma de fundición es posible hacerla girar sobre un eje vertical. Las piezas fundidas en máquinas centrífugas verticales más comunes son anillos y bolas de válvulas de bola. De ser necesario estas máquinas pueden ser montadas en fosas para seguridad y facilidad de operabilidad. En la figura 1.6 se muestra un ejemplo de una máquina centrífuga vertical.



Figura 1.6. Máquina de fundición centrífuga vertical.

Fuente: <https://bit.ly/2UwziRR>

1.5.2. Máquinas centrífugas horizontales

Las máquinas de fundición centrífuga horizontales se las utiliza cuando se requiere realizar fundiciones ferrosas y no ferrosas que tienen más largo que ancho. A nivel industrial estas están equipadas con un sistema de refrigeración por agua y una serie de variadores de velocidad los cuales se usan dependiendo del material que se vaya a

fundir. A continuación, en la figura 1.7 se muestra un ejemplo de una máquina de fundición centrífuga horizontal industrial.



Figura 1.7. Máquina de fundición centrífuga horizontal.

Fuente: <https://bit.ly/3dodT5U>

1.6. Sistemas de transmisión de movimiento

En primero lugar se tiene que definir lo que es un sistema de transmisión de movimiento, el cual es el conjunto de elementos que unidos o acoplados transmiten la fuerza y la potencia que son producidos por un elemento motriz o conductor, el cual puede ser un motor eléctrico, a otro elemento que se lo denomina elemento conducido.

Existe una gran variedad de sistemas para transmitir el movimiento generado por la aplicación de fuerzas, entre los principales tenemos los mecanismos de transmisión de movimiento lineal y circular. En el presente proyecto nos vamos a centrar específicamente en el segundo, en los mecanismos de transmisión de movimiento circular.

Entre los sistemas de transmisión de movimiento circular más importantes tenemos los siguientes:

- Ruedas de fricción.
- Sistema de poleas con banda.
- Tren de poleas con banda.
- Engranajes.
- Tornillo sin fin.
- Sistema de engranajes con cadena.

1.6.1. Ruedas de fricción

Este sistema se encuentra conformado por dos o más ruedas que están en contacto, la cual una de ellas es la rueda motriz, conductora o de entrada que es aquella que transmite el movimiento y la segunda es la rueda conducida o de salida tal y como se muestra en la figura 1.8.

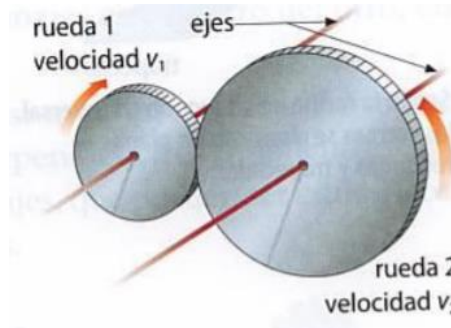


Figura 1.8. Sistema de ruedas de fricción.

Fuente: <https://bit.ly/39d6nYk>

1.6.2. Sistema de poleas con banda

Está formado por dos poleas que se encuentran a una distancia considerable, en la que sus ejes son paralelos los cuales tienden a girar al mismo tiempo debido a que se encuentran conectadas por una banda. La potencia de giro de una polea es transmitida a la otra haciendo que esta gire en el mismo sentido tal y como se muestra en la figura 1.9.

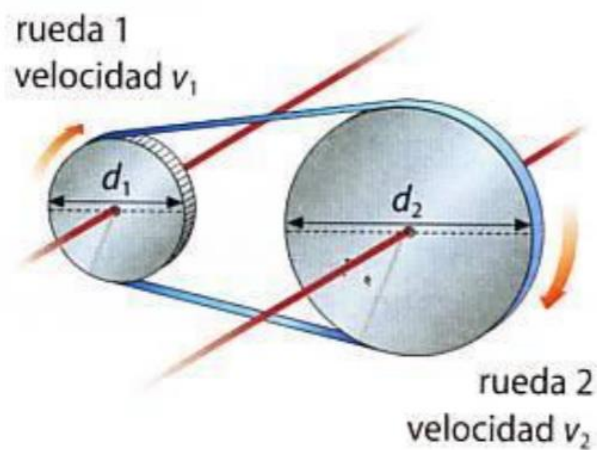


Figura 1.9. Sistema de poleas con banda.

Fuente: <https://bit.ly/39d6nYk>

Se puede determinar la velocidad de rotación de cada polea con la siguiente expresión que determina la relación de velocidades:

$$V1 * d1 = V2 * d2 \quad (1)$$

Donde:

V1: Velocidad de rueda conductora. (rpm)

V2: Velocidad de rueda conducida. (rpm)

d1: Diámetro de rueda conductora. (cm)

d2: Diámetro de rueda conducida. (cm)

1.6.3. Tren de poleas con banda

Es un sistema que está constituido por más de dos poleas. El movimiento del eje conectado a la polea 1 se transmite al eje conectado a las poleas 2 y 3 por medio de una banda que conecta a las poleas 1 y 2. Simultáneamente la rueda 3 transmite el movimiento al eje conectado a la polea 4 mediante una banda que conecta las poleas 3 y 4, tal y como se muestra en la figura 1.10.

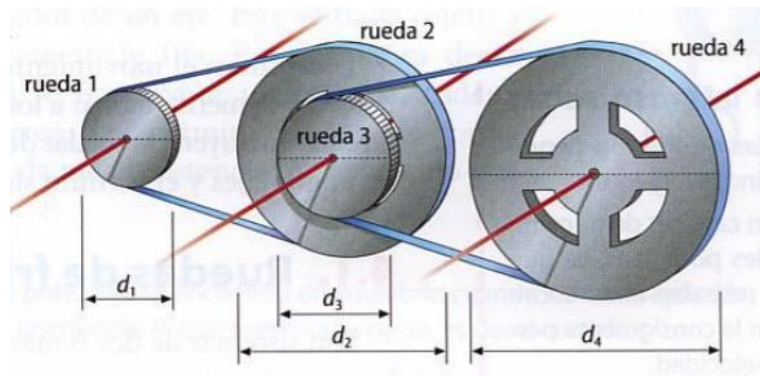


Figura 1.10. Tren de poleas con banda.

Fuente: <https://bit.ly/39d6nYk>

Al igual que el sistema de poleas con correa, la relación de velocidades se puede expresar mediante la siguiente expresión:

$$\frac{V1}{V4} = \frac{d2*d4}{d1*d3} \quad (2)$$

Donde:

V1: Velocidad de la rueda conductora. (rpm)

V4: Velocidad de rueda conducida. (rpm)

d1, d2, d3, d4: Diámetro de las poleas respectivamente. (cm)

A continuación, en la figura 1.11, se muestran los diferentes tipos de bandas que se utilizan.

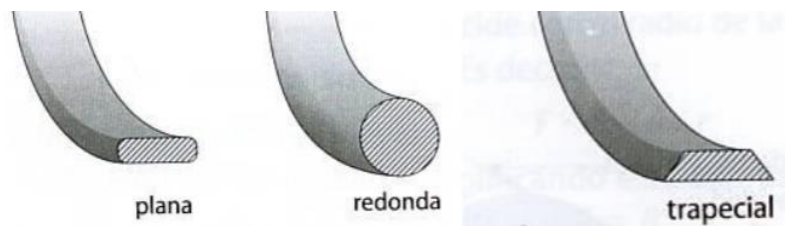


Figura 1.11. Tipos de correas.

Fuente: <https://bit.ly/39d6nYk>

1.6.4. Engranajes

Son ruedas dentadas que están en contacto y transmiten el movimiento entre dos ejes, estos pueden estar dispuestos de forma paralela, perpendicular u oblicuos. Existen diferentes tipos de engranajes los cuales son cilíndricos y cónicos por su forma y rectos o helicoidales por la forma de sus dientes como se muestra a continuación en la figura 1.12.

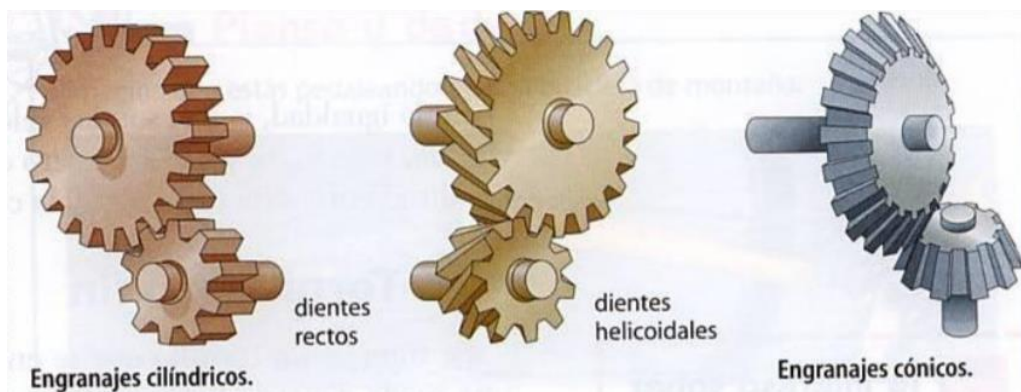


Figura 1.12. Tipos de engranajes.

Fuente: <https://bit.ly/39d6nYk>

Al igual que las poleas, los engranes tienen una relación de velocidades la cual depende del número de dientes de cada engrane y está representado en la siguiente expresión:

$$\frac{V1}{V2} = \frac{n2}{n1} \quad (3)$$

Donde:

V1: Velocidad de engranaje 1. [rpm]

V2: Velocidad de engranaje 2. [rpm]

n1: Número de dientes engranaje 1.

n2: Número de dientes engranaje 2.

1.6.5. Tornillo sin fin

En la figura 1.13 se muestra un esquema en donde se representa el tornillo sin fin, el cual está formado por un tornillo el cual está en contacto con un engranaje helicoidal cuyos ejes están dispuestos perpendicularmente. El movimiento del tornillo sin fin es transmitido al engrane de tal manera que una revolución del tornillo sin fin significa el movimiento de un diente en el engrane. Este sistema de transmisión de movimiento es muy útil en sistemas de reducción de velocidad.

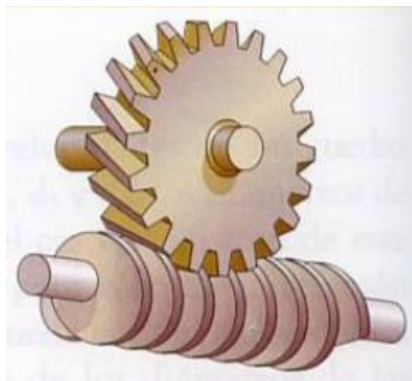


Figura 1.13. Sistema de tornillo sin fin.

Fuente: <https://bit.ly/39d6nYk>

1.6.6. Sistema de engranajes con cadena

Este sistema está formado por dos ruedas dentadas cuyos ejes son paralelos y se encuentran unidos mediante una cadena la cual engrana en los dientes de ambos engranes y transmite su movimiento. A diferencia de las poleas unidas mediante una

banda, este sistema permite la transmisión de movimiento sin pérdida de velocidad, debido a que no hay deslizamiento entre ambos elementos. A continuación, en la figura 1.14 se muestra una representación de este sistema.

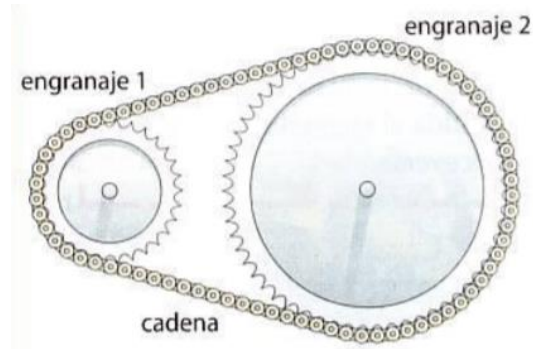


Figura 1.14. Sistema de engranajes con cadena.

Fuente: <https://bit.ly/39d6nYk>

1.7. Ensayos no destructivos

Los ensayos no destructivos se definen como los métodos utilizados para probar un material, una pieza o un sistema sin que afecte a su integridad. Estos ensayos se usan específicamente para evaluar propiedades de un objeto de prueba, haciendo la pregunta "¿Hay algún problema con este material?", por otro lado, las pruebas de rendimiento que se aplican preguntan: "¿Funciona este componente?".

Los ensayos no destructivos que abarcaremos en este proyecto son los siguientes:

- Inspección visual (VT)
- Líquidos penetrantes (PT)

1.7.1. Inspección visual (VT)

Este ensayo no destructivo consiste en la examinación de un material, pieza o componente para encontrar condiciones de no conformidad, utilizando la vista, la luz y de ser necesario otras herramientas. Para la inspección visual muchas veces se necesita sacudir, sentir, escuchar u oler el componente que se inspecciona. Pero depende netamente de cuatro factores listados a continuación:

- Calidad del detector: Vista o cámara
- Condiciones de iluminación

- Capacidad de procesar la información visual
- Nivel de entrenamiento y atención a los detalles

Debido al avance tecnológico la inspección visual se ha ido automatizando, reemplazando la manipulación de un inspector calificado para realizar el ensayo por cámaras y el uso de computadoras, a pesar de ello siempre debe existir la supervisión de un inspector para certificar dicho ensayo, ya que este puede utilizar otros sentidos que las máquinas no pueden hacerlo y detectar anomalías en el objeto puesto a prueba. La mayor ventaja de utilizar un sistema de inspección automática es la capacidad de realizar inspecciones con mayor rapidez es por ello que en su mayoría se lo utiliza en industrias que realizan producciones en serie.

El principal órgano que se utiliza para realizar la inspección visual es el ojo humano y una serie de factores de objeto que influyen al momento de realizar la inspección visual los cuales se explican a continuación:

- Iluminación

Para poder realizar una inspección de manera efectiva es necesario tener una buena iluminación la cual debe ser de 1000 lux o mayor. Un lux equivale a un lumen/m² y corresponde a la cantidad de luz que recibe una superficie y esta puede ser medida con la ayuda de un luxómetro.

- Luminancia

Corresponde a la luz que llega al ojo humano, la cual depende de la limpieza que tenga la superficie del objeto a inspeccionar. La limpieza del objeto es necesaria debido a que esta puede cubrir defectos que podrían ser detectados mediante este ensayo. A continuación, en la tabla 1.1 se muestra la cantidad de iluminación ambiental y local necesaria para realizar cada tipo de trabajo de inspección.

Tabla 1.1. Cantidad de iluminación ambiental y local según el tipo de trabajo.

TRABAJO	ILUMINACIÓN AMBIENTAL	ILUMINACIÓN LOCAL
BASTO	Mínimo 40 lux	50 – 100 lux
NORMAL	Mínimo 80 lux	100 – 300 lux
FINO	Mínimo 150 lux	300 – 1000 lux
ESPECIAL	Mínimo 300 lux	1000 – 4000 lux

- Basto: En este tipo de trabajo se identifican grandes marcas, así como también roturas en el material.
- Normal: Aquí se identifican marcas, irregularidades en las superficies del material las cuales se las verifica con el uso de talco.
- Fino: En un trabajo de inspección visual fino se inspecciona piezas con una reflectividad media. Se puede apoyar con el uso de partículas magnéticas o líquidos penetrantes.
- Especial: En este tipo de trabajo se realiza la inspección de materiales muy oscuros, así también como la detección de discontinuidades muy pequeñas.

- Brillo

El brillo influye notablemente en una inspección visual debido a que su exceso provoca el deslumbramiento, el cual provoca una pérdida de visión por un corto periodo de tiempo causado por una luz muy intensa y puede dificultar la inspección.

- Condiciones de superficie

Es importante realizar una inspección visual en una superficie en la que no exista óxido o contaminantes ya que estos pueden dificultar la detección de discontinuidades en el material a inspeccionar.

- Forma

Manipular el objeto a inspeccionar evitando que la forma de este redireccione la luz directamente a los ojos del inspector.

- Tamaño

De acuerdo con el tamaño del objeto a inspeccionar se puede determinar un patrón de examinación para observar claramente el objeto, en el caso de objetos muy pequeños puede ser necesario el uso de herramientas de magnificación para realizar una inspección correcta.

A continuación, se presentan factores humanos que influyen en la inspección visual:

- Ambiental

Se debe eliminar cualquier tipo de fondos o colores circundantes que puedan afectar una correcta inspección, así como también causar una fatiga visual al inspector.

- Fisiológico

Los cambios constantes en el movimiento de los ojos de quien inspecciona puede generar fatiga en los músculos de los ojos y puede causar una pérdida de claridad.

- Percepción

Se recomienda no tener cambios bruscos de iluminación y de ser el caso se recomienda dejar pasar 30 minutos para que el iris del inspector se ajuste y tome una visión normal y clara del objeto.

1.7.2. Líquidos penetrantes (PT)

Los ensayos no destructivos mediante líquidos penetrantes (PT) se dan debido a las limitaciones que la inspección visual llegó a presentar. Son utilizados para identificar discontinuidades en la superficie del material y por lo general se lo realiza a aleaciones no ferrosas ya que para aleaciones ferrosas es más efectivo realizar una inspección por partículas magnéticas.

El fundamento de este método se basa en la capacidad que tienen ciertos líquidos para penetrar superficies que presentan fisuras, grietas o poros en la superficie y ser retenidos. Esta capacidad de penetrabilidad depende de la mojabilidad, el ángulo de contacto entre líquido y sólido, la tensión superficial y la viscosidad, las cuales pueden ser explicadas mediante el fenómeno de capilaridad.

- Ventajas del ensayo de líquidos penetrantes
 - Es de fácil aplicación.
 - No requiere de mucho tiempo para obtener resultados concretos.
 - La forma y el tamaño de la pieza no es relevante.
 - Al ser ensayo no destructivo la pieza no se deteriora.
 - Es posible realizar el ensayo a toda la superficie de la pieza y no solamente a puntos específicos.
 - No se requiere de equipos costosos.
- Desventajas del ensayo de líquidos penetrantes
 - Es necesario realizar una correcta limpieza de las superficies a inspeccionar para no obtener resultados falsos.

- Es necesario retirar todo tipo de recubrimientos a piezas que los tengan ya que impiden el ingreso de la tinta en la superficie de la pieza.
- Es necesario tener experiencia en interpretación de resultados.

Para realizar el ensayo por líquidos penetrantes es necesario seguir un método general que se lo presenta a continuación:

1. Preparación de la superficie

Consiste en realizar una limpieza y secado completo eliminando residuos de óxido, grasa, pintura, aceite u otros elementos ajenos a la pieza a inspeccionar. Para esto no se debe usar cepillos de alambre ni esmeril, ya que esto puede dañar la superficie del material.

2. Aplicación del líquido penetrante

La aplicación del líquido penetrante se puede hacer mediante tres formas: a) por inmersión, en el cual se sumerge la pieza en el líquido penetrante; b) por extensión, en el cual se aplica el líquido penetrante con la ayuda de un pincel y c) por aspersion, el cual se lo aplica con un aerosol y es el método más usado.

3. Tiempo de penetración

Según el líquido penetrante utilizado y una vez que se ha cubierto la zona con él, se debe dejar un tiempo especificado por el fabricante para que el líquido actúe e ingrese en la pieza. Por lo general estas indicaciones las da el fabricante.

4. Remover el exceso de líquido penetrante

Una vez que ha transcurrido el tiempo de penetración es necesario remover el exceso de líquido penetrante de la superficie, para el cual se debe utilizar agua o solventes según sea indicado por el fabricante del líquido penetrante.

5. Aplicación del revelador

Una vez que se ha removido el exceso de penetrante del material y este a su vez ya esté seco se coloca el revelador el cual a su vez debe ser seleccionado según el tipo de penetrante usado, esta información es determinada por el fabricante, y por lo general el kit de líquido penetrante se lo adquiere en conjunto con su revelador.

6. Inspección e interpretación

Cuando el revelador se haya secado se procede a la visualización de la pieza a inspeccionar utilizando la luz natural o luz ultravioleta, según sea las indicaciones del penetrante utilizado. Cuando se observe una discontinuidad se identificará por la presencia de un color diferente en la superficie de la pieza. Por este método se pueden observar discontinuidades con dimensiones a partir de 0.2 micrones.

A continuación, en la imagen 1.15 se muestra el procedimiento indicado para una mejor percepción del proceso.

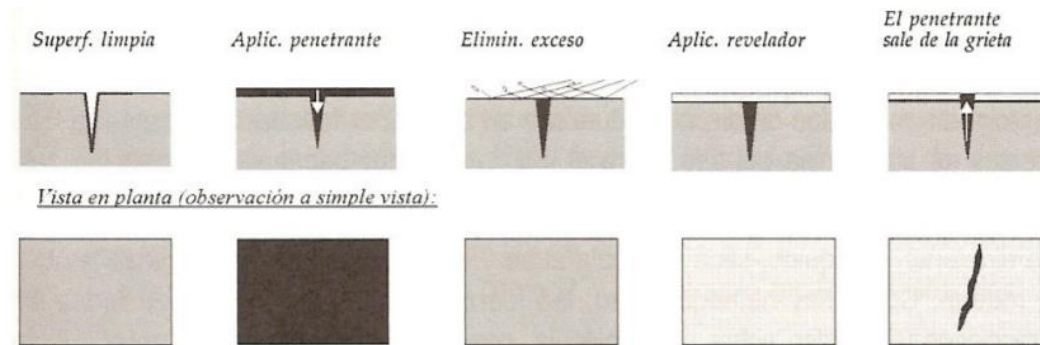


Figura 1.15. Proceso para aplicar líquidos penetrantes.

Fuente: <https://bit.ly/39nIRrR>

2. METODOLOGÍA

En el presente proyecto de titulación se realiza el rediseño y la construcción de la máquina de colado centrífugo horizontal de la Escuela Politécnica Nacional, se toma como punto de partida el diseño realizado en el trabajo de titulación “Obtención de tubos sin costura por el proceso de colado por centrifugado horizontal” [1], verificando el estado actual de la máquina, los sistemas y subsistemas funcionales y deficientes, debido a los cuales es necesario optar por el rediseño de la máquina. De esta manera se analizan cuáles son las posibles alternativas de solución para corregir dichas deficiencias en cada subsistema para posteriormente elegir la más adecuada utilizando la matriz morfológica y la matriz de criterios ponderados.

Una vez definidas las alternativas de solución, se realiza el modelamiento de la máquina de colado centrífugo horizontal en el software Solidworks 2018 presentando su estado actual y la modificación que sufrirá cada subsistema de la máquina, indicando los nuevos elementos que la conforman, así como su respectivo cálculo en los elementos que lo requieran y un análisis de esfuerzos en Solidworks Simulation.

Finalizado el diseño y respectivo cálculo se procede al ensamblaje de los componentes, indicando el proceso realizado para la modificación de la máquina de colado centrífugo horizontal para posteriormente realizar las pruebas de funcionamiento correspondientes utilizando los parámetros de funcionamiento recomendados indicados en el trabajo de titulación “Estudio paramétrico del proceso de colado centrífugo horizontal para la obtención de tubos de aluminio sin costura” [2], en los cuales se los definieron, así como los ensayos no destructivos de inspección visual (VT) y de líquidos penetrantes (PT) requeridos a la fundición de prueba.

2.1. Diseño conceptual y teórico de la máquina de colado centrífugo horizontal

Para iniciar el proceso de rediseño de la máquina de colado centrífugo horizontal es necesario indicar cual fue su estado inicial, el cual presentaba elementos de máquina deteriorados los cuales le apreciaban a simple vista, así como también algunos subsistemas que fueron desensamblados para utilizarlos en otras máquinas como es el caso del regulador de frecuencia, y también la presencia de aceite el cual indicaba la presencia de fugas de lubricante en distintas partes de la máquina, a continuación se muestra un esquema del diseño inicial de la máquina en la figura 2.1.

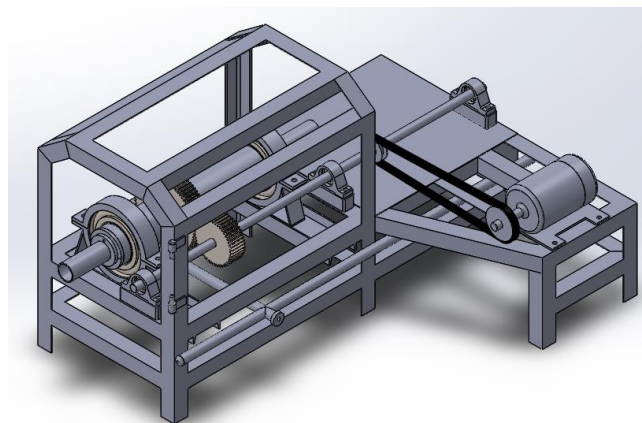


Figura 2.1. Sistema existente.

Fuente propia.

Posteriormente se realiza una prueba de funcionamiento, para así detectar los sistemas y subsistemas deficientes y de esta manera poder plantear diferentes alternativas de solución ya sea para su reemplazo o su rediseño.

2.1.1. Sistemas y subsistemas deficientes

A continuación, se muestran los diferentes subsistemas que presentan daños:

- Sistema de transmisión de movimiento

En el diseño original de el sistema de transmisión de la máquina de colado centrífugo horizontal como se especifica en [1], no existe una adecuada selección de materiales, el cual fue el motivo de la formación de una falla por fatiga en los dientes del engranaje, todo esto debido a la baja dureza superficial del material haciendo que exista un desprendimiento en la superficie de los dientes del engrane conductor como se muestra en la figura 2.2.



Figura 2.2. Engrane con falla por fatiga.

Fuente propia.

- Sistema de apoyo del molde

A los extremos del molde permanente de la máquina de colado centrífugo horizontal se encuentran dos chumaceras industriales con rodamientos de rodillos cónicos de un gran tamaño las cuales se muestran en la figura 2.3, estas permiten la rotación y la fijación del molde a la estructura metálica, el principal problema fue que al ser dos chumaceras industriales producían demasiado ruido y también presentaban fugas de lubricante desde su interior, haciendo que cuando la temperatura se incrementaba en el proceso

de colado este se quemara y saliera al exterior produciendo una serie de gases contaminantes.



Figura 2.3. Chumaceras industriales con rodamientos de rodillos cónicos.

Fuente propia.

A estos problemas se suma una excesiva vibración de todo el sistema. Debido a todos los problemas mencionados la máquina no pudo ser utilizada para los fines para los cuales fue construida, lo que hizo necesario que se plantee un rediseño el cual elimine todos estos problemas el cual estará enfocado en su mayoría en el sistema de transmisión de potencia motor – molde y en el apoyo del molde en la estructura metálica de la máquina de donde se cree es el principal origen de las fallas de la máquina.

2.1.2. Planteamiento y selección de alternativas de solución

Para el planteamiento y selección de alternativas se toman en cuenta los sistemas y subsistemas deficientes encontrados en la prueba de funcionamiento, así como también los siguientes parámetros de diseño que se consideraron importantes a la hora de la construcción de la máquina:

- Costos de fabricación

El costo para la fabricación de la máquina es un factor muy importante a la hora de seleccionar una alternativa de solución, ya que el costo total de materiales y ensamblaje de las partes es cubierto en su totalidad por el autor.

- Facilidad de fabricación

El diseño y materiales seleccionados deben ser de fácil fabricación o maquinabilidad, ya que la modificación y ensamblaje de estos es realizado por el autor.

- Mantenimiento

Al ser una máquina que forma parte del laboratorio de fundición, está expuesta a polvo y partículas metálicas, por esta razón el diseño seleccionado debe garantizar un fácil mantenimiento para que se lo pueda realizar sin complicaciones por cualquier miembro del laboratorio.

Tomando en cuenta los anteriores factores se procede al planteamiento de tres alternativas de solución tomando en cuenta tres subsistemas que se indican a continuación:

- Transmisión eje – molde
- Apoyos del molde
- Motor

2.1.3. Subsistema 1: Transmisión eje – molde

A continuación, se presentan tres alternativas de solución para el problema del subsistema 1 que consiste en la transmisión de movimiento del eje motriz al molde.

- Alternativa A (Transmisión por ruedas dentadas)

La alternativa de solución A para el subsistema 1, Transmisión eje – molde, consiste en la transmisión de la potencia necesaria para lograr la rotación del molde a través de un sistema de ruedas dentadas, en donde la rueda mayor es adaptada al molde y la rueda menor es fijada en el eje principal como se muestra en la figura 2.4.

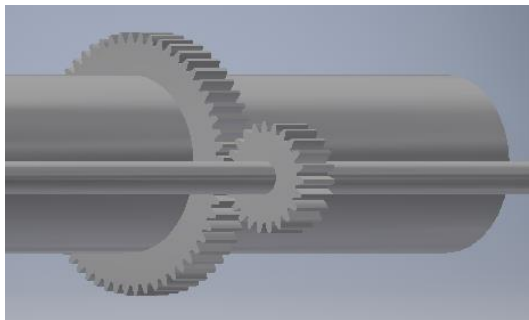


Figura 2.4. Transmisión de movimiento por ruedas dentadas.

Fuente propia.

- Alternativa B (Transmisión por Fricción a través de 2 rodets conductores y 2 rodets conducidos)

La alternativa de solución B para el subsistema 1 concerniente a la transmisión de movimiento eje – molde, consiste en la transmisión de la potencia suministrada por el motor a través de un eje en el cual se encuentran acoplados dos rodets que serán los conductores, paralelo a cada rodete conductor se encuentra un rodete conducido los cuales estarán acoplados a la estructura, adicionalmente en la parte superior del molde se tiene una palanca en la cual se encuentra acoplado un rodete cuya función será la de asegurar el sistema y evitar que el molde tienda a desplazarse hacia la parte superior. Este sistema se muestra a continuación en la figura 2.5.

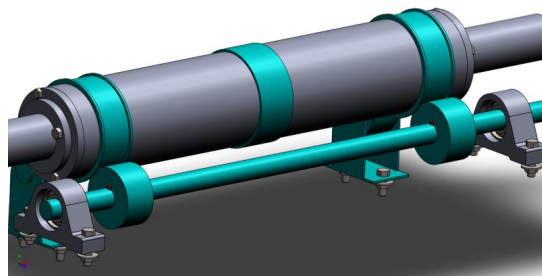


Figura 2.5. Transmisión de movimiento por rodets conductores y conducidos.

Fuente propia.

- Alternativa C (Transmisión por Fricción con 6 rodets)

En la figura 2.6 se muestra la alternativa de solución C al subsistema 1 en el cual se transmite la potencia del motor mediante un eje, el cual se conecta al molde con un sistema de dos ejes con tres rodets acoplados en cada uno. El eje 1 es el que transmite la potencia del motor y el eje 2 servirá como guía ya que sobre ambos se encuentra apoyado el molde, el cual tiene 3 canales en los cuales existe el contacto molde – rodete, y servirá para que el molde no tenga un desplazamiento axial.

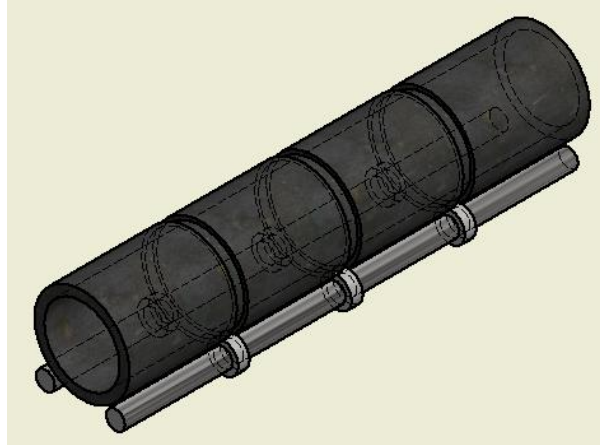


Figura 2.6. Transmisión de movimiento por 6 rodetes.

Fuente propia.

2.1.4. Subsistema 2: Apoyo del Molde

A continuación, se presentan tres alternativas de solución para el problema del subsistema 2 que consiste en el apoyo del molde en la estructura de la máquina.

- Alternativa A (Apoyo en Chumaceras)

La primera alternativa de solución para el subsistema 2 concerniente al apoyo del molde en la estructura consiste en que el molde se apoye en un par de chumaceras las cuales se encuentran en los extremos de este y estén ancladas en la estructura metálica, este sistema se encuentra aplicado en la actualidad como se indica en la figura 2.7 y la solución consistiría en el reemplazo de estas.



Figura 2.7. Apoyo del molde en chumaceras.

Fuente propia.

- Alternativa B (Apoyo en 4 rodets y sujeción en la parte superior)

En la figura 2.8 se muestra la alternativa B para el subsistema 2 en el cual el molde está apoyado sobre dos rodets acoplados al eje principal y a dos rodets conducidos acopladas en la estructura de la máquina, los cuales cumplen la función de transmitir la potencia del motor y también de dar soporte al molde respectivamente. Adicionalmente el molde tiene en su centro una pista la cual entra en contacto con una rueda acoplada a una palanca que se encuentra en la parte superior cuya función es evitar que el molde tenga un desplazamiento axial.

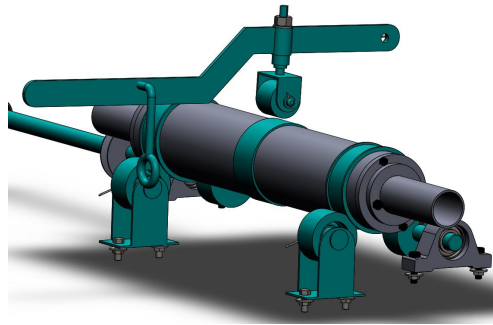


Figura 2.8. Apoyo del molde en rodets con palanca superior.

Fuente propia.

- Alternativa C (Apoyo en Rodets en la parte inferior)

En la alternativa de solución C, el molde se encuentra apoyado en 6 rodets los cuales se encuentran acoplados en 2 ejes como se muestra en la figura 2.9, los cuales transmiten la potencia del motor y también funcionan como apoyo para el molde.

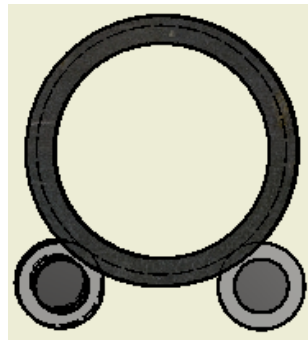


Figura 2.9. Apoyo del molde en 6 rodets acoplados a 2 ejes.

Fuente propia.

2.1.5. Subsistema 3: Motor

- Alternativa A

Como subsistema 3 se indica el motor impulsor de la máquina el cual es actualmente un motor eléctrico, este consta con la potencia necesaria para cumplir con las condiciones de funcionamiento de la máquina por esta razón no se plantea un reemplazo. A continuación, en la figura 2.10 tenemos una representación de un motor eléctrico.



Figura 2.10. Motor eléctrico.


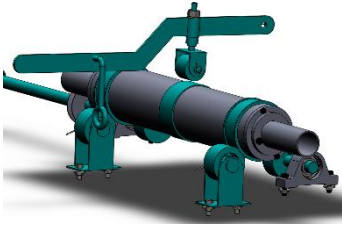
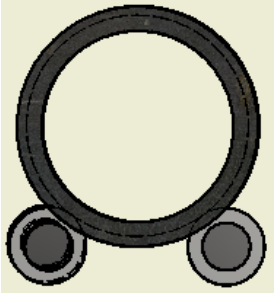



Fuente: <https://bit.ly/352OB9N>

2.1.6. Matriz Morfológica

Una vez planteadas las diferentes alternativas de solución para cada subsistema, se procede a realizar la matriz morfológica como se muestra a continuación en la tabla 2.1, la cual agrupa todas las alternativas de solución en forma gráfica, esto nos permitió realizar un análisis correcto y ordenado para posteriormente realizar la elección de la alternativa correcta mediante el método de la matriz de criterios ponderados.

Tabla 2.1. Matriz morfológica.

MATRIZ MORFOLÓGICA			
SUBSISTEMA	ALTERNATIVAS		
	A	B	C
TRANSMISION MOLDE - EJE			

APOYOS DEL MOLDE			
MOTOR			

- Resumen de Alternativas.

Alternativa A: Transmisión por ruedas dentadas – Apoyo en Chumaceras – Motor Eléctrico.

Alternativa B: Transmisión por Fricción a través de 2 rodetes conductores y 2 rodetes conducidos – Apoyo en 4 rodetes y sujeción en la parte superior – Motor Eléctrico.

Alternativa C: Transmisión por Fricción con 6 rodetes – Apoyo en Rodetes en la parte inferior – Motor Eléctrico.

2.1.7. Selección de alternativa de solución mediante el método ordinal de criterios ponderados

Se selecciona de la alternativa de solución más adecuada para la máquina coladora centrífuga horizontal mediante la aplicación del método ordinal de criterios ponderados planteado por Riba [9], el cual consiste en evaluar cada alternativa con respecto a ciertos criterios importantes que se deben tomar en cuenta al momento del diseño, cada criterio debe estar dispuesto en una tabla para compararlos con los demás criterios asignando valores según sea el caso como se indican a continuación:

- 1 Se asigna el valor de 1 si el criterio indicado en las filas es mejor o tiene una mayor importancia que el criterio de las columnas.
- 0,5 Se asigna este valor si el criterio en las filas es igual o tiene la misma importancia que el criterio en las columnas.
- 0 Se coloca el valor de 0 si el criterio ubicado en las filas es peor o de menor importancia que el criterio ubicado en las columnas.

Una vez asignados los valores a cada criterio estos deben sumarse y se coloca en una columna añadiendo una unidad a cada uno, esto para evitar que el criterio con menos importancia tenga un valor de cero puntos, finalmente en la siguiente columna se calcula el valor ponderado de cada criterio.

Por último, el resultado final para cada solución es la suma de los productos de los valores específicos de cada solución por el valor específico de cada criterio.

Criterios para tomar en cuenta en el diseño de la máquina coladora centrífuga:

- Transmisión
- Montaje
- Regulación
- Precio

A continuación, se debe calcular el valor específico de cada uno de los cuatro criterios cuyo procedimiento se presenta a continuación en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Valor específico de cada criterio.

Transmisión > Montaje > Regulación = Precio						
Criterio	Transmisión	Montaje	Regulación	Precio	$\sum + 1$	Ponderado
Transmisión	-	1	1	1	4	0,4
Montaje	0	-	1	1	3	0,3
Regulación	0	0	-	0,5	1,5	0,15
Precio	0	0	0,5	-	1,5	0,15
Suma					10	1

Como siguiente punto se debe calcular los valores específicos de las diferentes soluciones para cada criterio.

En las tablas 2.3, 2.4, 2.5 y 2.6 se muestra el cálculo del valor específico de los diferentes criterios de diseño como lo son transmisión, montaje, regulación y precio respectivamente.

Las soluciones planteadas anteriormente son las siguientes:

Alternativa A: Transmisión por ruedas dentadas – Apoyo en Chumaceras – Motor Eléctrico.

Alternativa B: Transmisión por Fricción con 2 rodets conductores y 2 rodets conducidos – Apoyo 4 rodets y sujeción en la parte superior – Motor Eléctrico.

Alternativa C: Transmisión por Fricción con 6 rodetes – Apoyo en Rodetes en la parte inferior – Motor Eléctrico.

Tabla 2.3. Valor específico para el criterio transmisión.

Alternativa B > Alternativa C > Alternativa A					
Transmisión	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C	$\sum + 1$	Ponderado
Alternativa A	/	0	0	1	0,166
Alternativa B	1	/	1	3	0,5
Alternativa C	1	0	/	2	0,333
Suma				6	1

Tabla 2.4. Valor específico para el criterio montaje.

Alternativa C > Alternativa B > Alternativa A					
Montaje	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C	$\sum + 1$	Ponderado
Alternativa A	-	0	0	1	0,166
Alternativa B	1	-	0	2	0,333
Alternativa C	1	1	-	3	0,5
Suma				6	1

Tabla 2.5. Valor específico para el criterio regulación.

Alternativa B > Alternativa C > Alternativa A					
Regulación	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C	$\sum + 1$	Ponderado
Alternativa A	-	0	0	1	0,166
Alternativa B	1	-	1	3	0,5
Alternativa C	1	0	-	2	0,333
Suma				6	1

Tabla 2.6. Valor específico para el criterio precio.

Alternativa B > Alternativa C > Alternativa A					
Precio	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C	$\sum + 1$	Ponderado
Alternativa A	-	0	0	1	0,166
Alternativa B	1	-	1	3	0,5
Alternativa C	1	0	-	2	0,333
Suma				6	1

Una vez obtenidos los valores específicos de cada criterio, se procede a realizar la suma de los productos de los valores específicos de cada solución por el valor específico de cada criterio y se tiene la tabla 2.7, que muestra las conclusiones y los resultados del método ordinal de criterios ponderados.

Tabla 2.7. Resultados del método ordinal de criterios ponderados.

Conclusión	Transmisión	Montaje	Regulación	Precio	Σ	Prioridad
Alternativa A	0,0664	0,0498	0,0249	0,0249	0,166	3
Alternativa B	0,2	0,0999	0,075	0,075	0,4499	1
Alternativa C	0,1332	0,15	0,04995	0,04995	0,3831	2

Como conclusión del método ordinal de criterios ponderados tenemos que la alternativa de solución que más se adapta a los requerimientos que necesita la máquina de colado centrífugo es la alternativa B, la cual está descrita a continuación:

Alternativa B: Transmisión por Fricción con 2 rodets conductores y 2 rodets conducidos – Apoyo en 4 rodets en la parte inferior y sujeción en la parte superior – Motor Eléctrico.

2.1.8. Rediseño del sistema de transmisión de la máquina de colado centrífugo horizontal

Para realizar el rediseño de la máquina de colado centrífugo horizontal se debe tener en cuenta los parámetros de funcionamiento de la máquina, para a partir de ellos tener un punto de partida en los nuevos cálculos y en los cambios de elementos de máquina que se requieran efectuar.

En el estudio llamado “Estudio Paramétrico del Proceso de Colado Centrífugo Horizontal para la Obtención de Tubos de Aluminio” realizado por Gómez y Jami [2], se determinó los parámetros ideales de funcionamiento para la máquina de colado centrífugo horizontal, estos parámetros fueron los resultados de su trabajo y con ellos se logran resultados óptimos los mismos que se resumen a continuación en la tabla 2.8.

Tabla 2.8. Parámetros de funcionamiento óptimos de la máquina de colado centrífugo horizontal.

Parámetros de Funcionamiento	
Temperatura de Pre calentamiento	165 °C
Temperatura de Colado	801 °C
Temperatura promedio del molde	165 – 500 °C
Velocidad de rotación del molde	1198 rpm

A continuación, en la figura 2.11 se presenta la modificación que tendrá el sistema de transmisión motor – molde de la máquina de colado centrífugo horizontal el cual fue modelado en el software de diseño mecánico SolidWorks 2018.

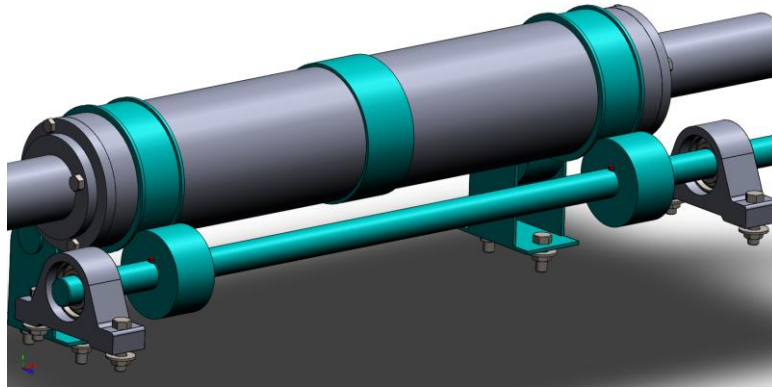


Figura 2.11. Sistema de transmisión propuesto.

Fuente: Propia.

El sistema de transmisión de la máquina de colado centrífugo estará conformado por los siguientes elementos:

- Molde
- Motor eléctrico.
- Eje conductor.
- 2 Rodetes conductores.
- 2 Rodetes conducidos.

2.1.9. Molde

La máquina de colado centrífugo utiliza como molde un elemento de tubería que fue proporcionado por la empresa estatal Petroecuador en el año 2011, el cual cumplía con la función de circular combustible soportando altas temperaturas y una presión similar a la que se requiere para el colado centrífugo, en la tabla 2.9 se muestran las características y dimensiones del molde, y en la tabla 2.10 se muestran las propiedades físicas del acero A36 material del cual está hecho el molde.

Tabla 2.9. Características y dimensiones del molde

Características	Valor	Unidades
Material	Acero A36	
Masa	15,591	Kg
Largo	60,96	cm
Diámetro Mayor	12,54	cm
Diámetro Menor	9,98	cm
Área	4055,28	cm ²
Volumen	2190,95	cm ³

Fuente: Norma API para tuberías de oleoducto.

Tabla 2.10. Propiedades Físicas Acero A36

Propiedades Físicas del Acero A36		
Densidad	7850	kg/m ³
Límite de Fluencia	250	MPa
Resistencia a la rotura	410	MPa
Resistencia a la Tracción	450	MPa
Dureza	120 - 125	HB

A continuación en la figura 2.12 se presenta el molde existente sin modificaciones. El nuevo sistema trata de hacer girar el molde por medio de rodets en los cuales el molde se apoya para luego hacerlo girar.

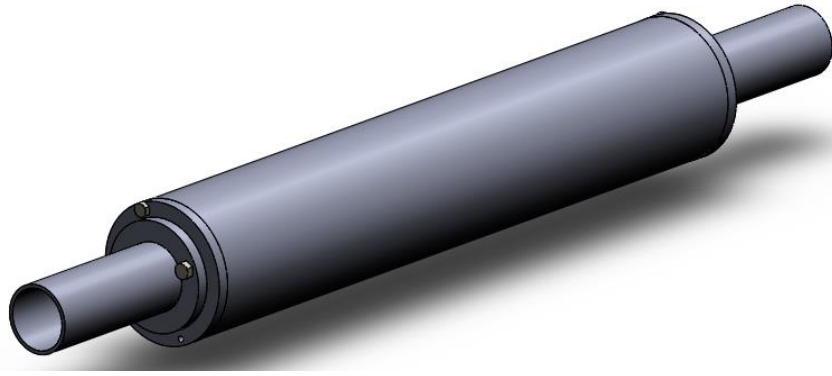


Figura 2.12. Molde sin modificaciones.

Fuente: Propia.

Para que no exista contacto directo entre el molde y los rodetes, se agregaran pistas las cuales permitirán el apoyo del rodete y también evitarán el movimiento axial el cual es producido por el giro del molde. Las pistas colocadas en los extremos del molde contarán con una pestaña como se muestra en la figura 2.13, las cuales serán las encargadas de absorber los movimientos axiales mencionados anteriormente ya que en el interior de esa pestaña se posicionará el rodete, mientras que en la pista colocada en la mitad del molde se posicionará un guiador, el cual actuará como palanca de seguridad y evitará que el molde tienda a desplazarse en dirección transversal.

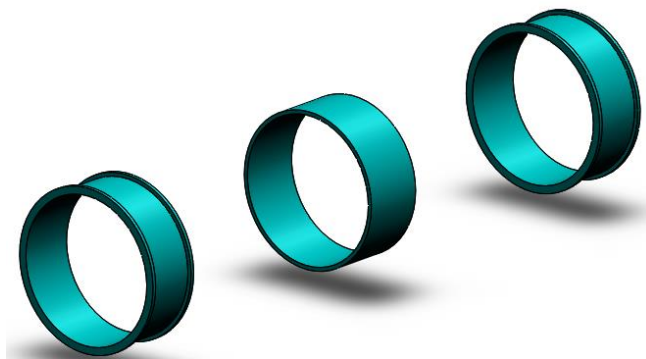


Figura 2.13. Pistas del molde.

Fuente: Propia

En la figura 2.14 se muestra el molde junto con las pistas, las cuales serán unidas a presión y aseguradas con 2 puntos de soldadura para evitar que estas se desplacen a medida que la temperatura aumente en el proceso de colado.

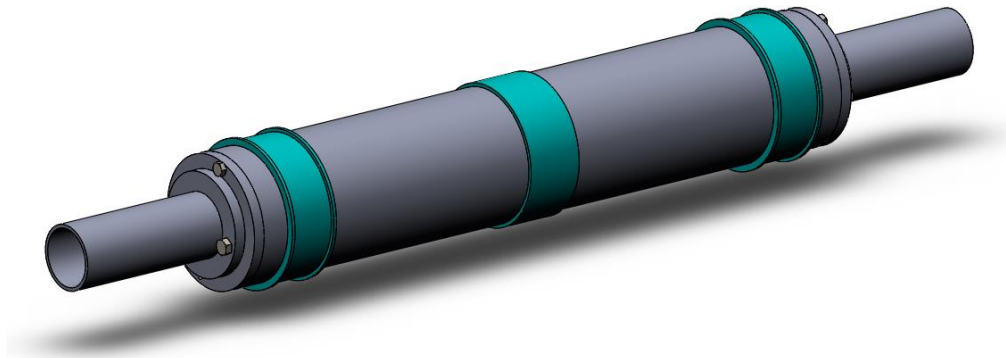


Figura 2.14. Molde con pistas.

Fuente: Propia

Mediante el software SolidWorks se realizó una simulación sobre las pistas del molde, la cual representa el contacto físico que tiene con los rodetes. Se aplicó una fuerza de 200 [N] que es mayor a los 122,5 [N] que debe soportar cada pista para visualizar de mejor manera los efectos que causa la fuerza. En la figura 2.15 se muestra la distribución de los esfuerzos a lo largo de la pista y en la tabla 2.11 se representan los valores obtenidos de esta simulación.

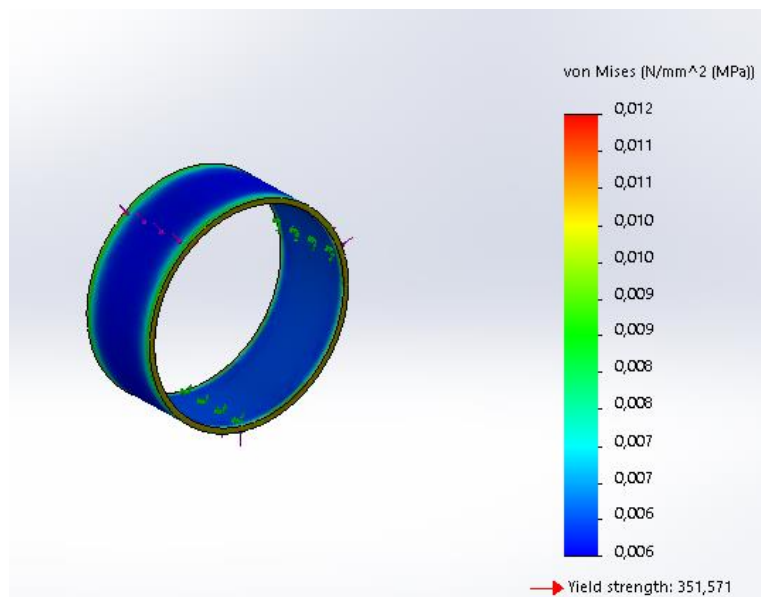


Figura 2.15. Distribución de esfuerzos sobre la pista del molde.

Fuente: Propia

Tabla 2.11. Resultados de análisis en SolidWorks sobre la pista del molde

Limite Elástico	351 [MPa]
Esfuerzo Máximo	0.012 [MPa]

Fuente: Propia.

Como se puede observar en la tabla 2.10 el valor del esfuerzo máximo provocado sobre la pista del molde es de 0,012 [MPa], un valor demasiado pequeño comparado con el valor del límite elástico. Esto nos asegura que la pista no va a fallar en ningún aspecto bajo las condiciones planteadas.

Para el cálculo de la potencia del motor eléctrico que impulsará a la máquina coladora centrífuga es necesario conocer la carga que debe ser impulsada la cual se calcula a continuación:

$$P = \text{Peso del molde} + \text{peso del aluminio}$$

$$P = 15,591 \text{ [kg]} + 4,25 \text{ [kg]}$$

$$P = 19,841 \text{ [kg]} = 194,44 \text{ [N]}$$

Para la metodología de cálculo se usará un peso promedio de 50 kg, debido a que se necesita que la máquina resista en condiciones de mayor carga y alta temperatura. Por ello es necesario asegurar su funcionamiento, resistencia y durabilidad. La carga total de 50 kg será distribuida entre 4 rodillos ya que el molde se encuentra apoyado en ellos y estará totalmente centrado como se muestra en la figura 2.16.

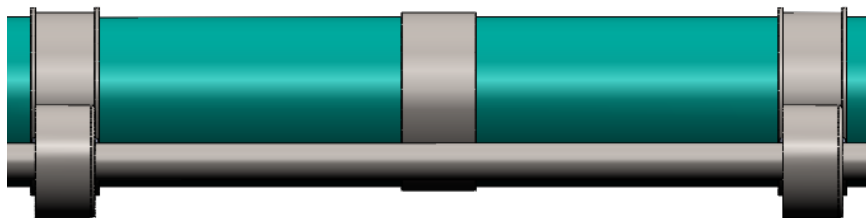


Figura 2.16. Molde sobre rodillos.

Fuente: Propia

Los datos de la tubería de aluminio son resultado del trabajo de Jami y Gómez [2] y se presentan a continuación en la tabla 2.12.

Tabla 2.12. Dimensiones de tubería de aluminio a obtener

Dimensiones de Tubería de Aluminio	
Peso promedio	4,25 [kg]
Longitud	50 [cm]
Diámetro menor a la entrada	67,35 [mm]
Diámetro menor a la salida	67,75 [mm]
Diámetro mayor a la entrada	91,9 [mm]
Diámetro mayor a la salida	94,1 [mm]

Fuente: “Estudio Paramétrico del Proceso de Colado Centrífcgo Horizontal Para la Obtención de Tubos de Aluminio Sin Costura” [2]

- Cálculo de la velocidad angular del eje del motor

En primer lugar es necesario calcular la velocidad angular que tendrá el eje del motor, partiendo como dato la velocidad angular óptima del molde definida por Gómez y Jami [2] que alcanza los 1198 RPM y utilizando la ecuación (4) se procede al cálculo de esta. A continuación en la figura 2.17 se representan las velocidades angulares presentes en el sistema de transmisión de la máquina de colado centrfcgo horizontal:

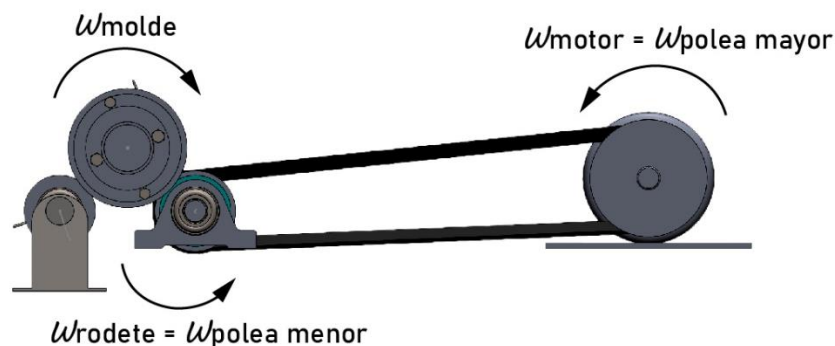


Figura 2.17. Velocidades angulares en la máquina de colado centrfcgo horizontal.

Fuente: Propia

$$\omega_{molde} * r_{molde} = \omega_{rodete} * r_{rodete} \quad (4)$$

Donde:

$$\omega_{molde} = \text{Velocidad angular del molde} = 1198 \text{ [rpm]}$$

$$r_{molde} = \text{Radio del molde} = 61 \text{ [mm]}$$

$$\omega_{rodete} = \text{Velocidad angular del rodete.}$$

$$r_{rodete} = \text{Radio del rodete} = 38,1 \text{ [mm]}$$

$$1198 \text{ [rpm]} * 61 \text{ [mm]} = \omega_{rodete} * 38,1 \text{ [mm]}$$

$$\omega_{rodete} = 1918,05 \text{ [rpm]}$$

La velocidad angular del rodete es 1918,05 rpm y al estar montado en el mismo eje de la polea de transmisión menor esta tiene la misma velocidad angular, a continuación utilizando la misma ecuación (10) se calcula la velocidad angular del motor:

$$\omega_{rodete} = \omega_{Polea\ menor}$$

$$\omega_{polea\ menor} * r_{polea\ menor} = \omega_{Polea\ mayor} * r_{Polea\ mayor}$$

Donde:

$$\omega_{Polea\ Mayor} = \omega_{motor} = \text{Velocidad angular del motor.}$$

$$r_{Polea\ Mayor} = \text{Radio de la polea del motor} = 50 \text{ [mm]}$$

$$\omega_{Polea\ menor} = \text{Velocidad angular de la polea menor} = 1918,05 \text{ [rpm]}$$

$$r_{Polea\ menor} = \text{Radio de la polea menor} = 30 \text{ [mm]}$$

$$1918,05 \text{ [rpm]} * 30 \text{ [mm]} = \omega_{motor} * 50 \text{ [mm]}$$

$$\omega_{motor} = 1150,8 \text{ [rpm]}$$

De igual manera la polea mayor del sistema de transmisión motor – eje, al estar montada en el mismo eje del motor tendrá la misma velocidad angular que el motor, por lo tanto la velocidad angular del motor es 1150,8 rpm.

2.1.10. Diseño del Eje Conductor

El eje conductor es uno de los elementos más importantes en la máquina de colado centrifugo horizontal ya que es el encargado de transmitir el movimiento de rotación del motor al molde sobre el cual vertimos la colada fundida de aluminio a una temperatura de 800 °C, razón por la cual el entorno de la máquina está trabajando con altas temperaturas, y ese es el caso del presente eje. Se estima que el eje estará trabajando

alrededor de los 300 °C. Debido a todas estas condiciones podemos afirmar que el eje trabaja a fatiga, motivo por el cual se realizará el diseño a fatiga.

Sobre el eje están actuando las cargas debido al peso del molde y del metal fundido, asumiendo que las cargas son estables. El eje rota con una velocidad angular de 1198 rpm velocidad determinada por Gómez y Jami. [2]

A continuación se presenta el proceso de diseño del nuevo eje conductor, tomando en cuenta los pasos que indica el libro “Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley” [10], el cual en primer lugar consiste en realizar un análisis de cargas en los distintos puntos en donde actúan las fuerzas en el eje.

- Análisis de Cargas

Para realizar un correcto análisis de las fuerzas que actúan sobre el eje conductor es necesario realizar un análisis en los elementos que soportan dichas fuerzas.

Análisis de cargas en los rodetes conductores

Los rodetes son los elementos en los cuales está apoyado el molde junto con la colada de aluminio al momento de realizar el proceso de colado para obtener los tubos de aluminio. En la figura 2.18 se observa la descomposición de la fuerza P en la fuerza F que corresponde a la fuerza que actuará en cada rodete.

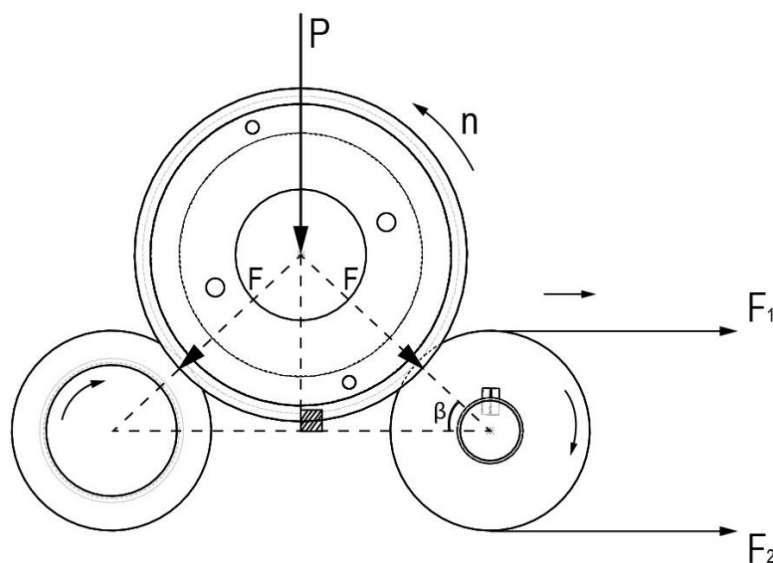


Figura 2.18. Análisis de cargas en el sistema molde - rodete.

Fuente: Propia

Por geometría se puede determinar el valor del ángulo β , el cual es igual a 37° y con ayuda de la ecuación (5) se determina los siguientes valores:

$$P = 4 * F * \text{Sen}(\beta) \quad (5)$$

Donde:

P : Peso del molde junto con la colada de aluminio = 50 [Kg]

F : Fuerza que soporta cada rodete.

Despejando F de la ecuación (5) tenemos:

$$F = \frac{P}{4 * \text{Sen}(\beta)}$$

$$F = \frac{490,5 [N]}{4 * \text{Sen}(37^\circ)}$$

$$F = 167,66 [N]$$

Una vez obtenida la fuerza F se procede a obtener sus componentes como se indica en la figura 2.19.

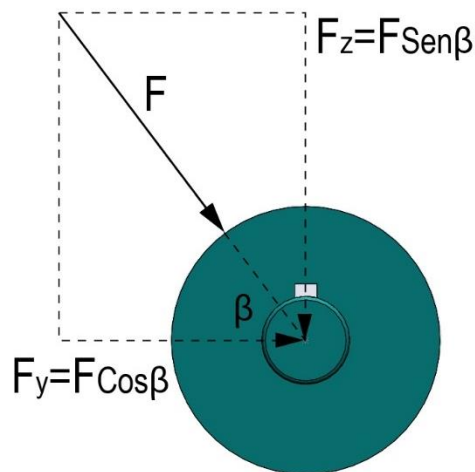


Figura 2.19. Descomposición de la fuerza F .

Fuente: Propia

De la figura 2.21 se calcula F_y y F_z :

$$F_y = 114,34 [N]$$

$$F_z = 114,34 [N]$$

Donde:

F_y : Componente de F en el eje Y.

F_z : Componente de F en el eje Z.

Para que se produzca el movimiento rotatorio existe un torque producido por el motor eléctrico el mismo que se muestra a continuación en la figura 2.20.

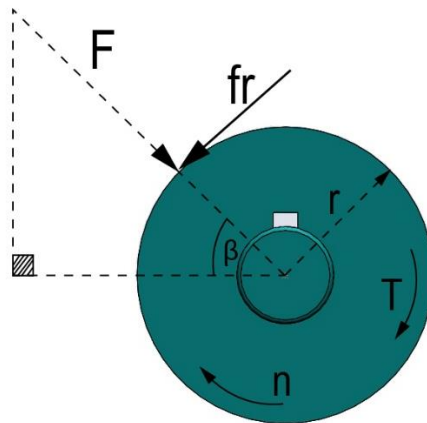


Figura 2.20. Descomposición de la fuerza F.

Fuente: Propia

En la figura 2.20 se observa la presencia de una fuerza de rozamiento f_r la misma que es contraria al sentido de movimiento y se calcula a continuación con la ecuación (6):

$$f_r = f * F \quad (6)$$

Donde:

f_r : Fuerza de rozamiento entre el rodete y el molde.

f : Coeficiente de fricción acero – acero = 0,2. [10]

F: Fuerza que soporta cada rodete.

$$f_r = 0,2 * 167,66 [N]$$

$$f_r = 33,53 [N]$$

De la figura 2.22 también se obtiene el torque mencionado anteriormente realizando un análisis y tomando como referencia el centro del rodete:

$$\sum T_0 = 0$$

$$T - f_r * r = 0 \quad (7)$$

Donde:

T : Torque .

f_r : Fuerza de rozamiento entre el rodete y el molde.

r : Radio del rodete = 0,0762 [m]

Se debe tomar en cuenta que el torque total aplicado debe ser capaz de vencer la fuerza de rozamiento en los 4 apoyos que tiene el molde, por esa razón se lo multiplica por 4 y se lo llamará T_B ya que está aplicado en el punto B del eje, despejando T_B de la expresión (7) tenemos:

$$T_B = 4 * f_r * r$$

$$T_B = 4 * 33,73 [N] * 0,0762 [m]$$

$$T_B = 10,22 [N * m]$$

Una vez obtenido el valor del torque total necesario para hacer rotar el molde con la colada fundida, se calcula la potencia P del motor necesaria con la ecuación (8) que se indica a continuación:

$$P = T_B * \omega \quad (8)$$

Donde:

P : Potencia del motor eléctrico.

T_B : Torque.

ω : Velocidad angular = 1198 [rpm] = 125,454 [rad/s]

$$P = 10,22 [N * m] * 125,454 [rad/s]$$

$$P = 1282,27 [watts]$$

$$P = 1,68 [HP]$$

El motor eléctrico debe tener una potencia mínima de 1,68 HP. El motor con el que cuenta actualmente tiene una potencia de 5 HP, por esa razón solamente se variará la frecuencia para controlar la velocidad angular mediante un variador de frecuencia.

En la figura 2.20 se puede observar la presencia del par de fuerzas F_1 y F_2 , las mismas que corresponden a las fuerzas de tensión generadas por la polea y el motor. Para calcular estas fuerzas es necesario el cálculo de la fuerza F_i que es la fuerza de tensado de la banda en V y se determina a continuación con la ecuación (9):

$$F_i = \frac{T (e^{f'\phi} + 1)}{d (e^{f'\phi} - 1)} \quad (9)$$

Donde:

F_i = Fuerza de Tensado.

T = Torque.

d = Diámetro de la polea en el punto B = 60 mm

f' = Coeficiente de fricción banda – polea en V.

ϕ = Ángulo de contacto de la banda con la polea.

Del modelado en Solidworks se obtiene que el valor de ϕ es igual a 170° lo que es igual a 2,96 radianes.

Para el cálculo de f' se utiliza la expresión (10):

$$f' = \frac{f}{\text{sen}\left(\frac{\phi}{2}\right)} \quad (10)$$

Donde:

f = Coeficiente de fricción cuero – acero = 0,4. [10]

ϕ = Ángulo de polea en V = 40° . [10]

$$f' = \frac{0,4}{\text{sen}\left(\frac{40^\circ}{2}\right)}$$

$$f' = 1,1695$$

Una vez obtenidos todos los valores es posible proceder con el cálculo de la fuerza de tensado en B F_i :

$$F_i = \frac{T (e^{f'\phi} + 1)}{d (e^{f'\phi} - 1)}$$

$$F_i = 181,29 [N]$$

La fuerza F_1 en el lado tenso de la banda se calcula con la expresión (11) que se muestra a continuación:

$$F_1 = F_c + F_i \frac{2e^{f'\phi}}{e^{f'\phi} + 1} \quad (11)$$

Donde:

F_1 = Fuerza en el lado tenso de la banda.

F_c = Fuerza centrífuga.

F_i = Fuerza de tensado.

f' = Coeficiente de fricción banda – polea en V.

ϕ = Ángulo de contacto de la banda con la polea.

Donde F_c se determina con la expresión (12):

$$F_c = mr^2\omega^2 = \frac{\gamma}{g}(A)V^2 \quad (12)$$

Donde:

F_c : Fuerza centrífuga.

γ : Peso específico de banda en V = 11120,55 $\left[\frac{N}{m^3}\right]$. [10]

g : Gravedad.

A : Área de la sección transversal de la banda en V = 0,0000838 $[m^2]$.

V : Velocidad del rodete = 6 $\left[\frac{m}{s}\right]$

$$F_c = 3,42 [N]$$

Obtenida la fuerza centrífuga se procede al cálculo de la fuerza en el lado tenso de la banda F_1 :

$$F_1 = F_c + F_i \frac{2e^{f'\phi}}{e^{f'\phi} + 1}$$

$$F_1 = 355,06 [N]$$

Cálculo de la fuerza en el lado flojo de la banda F_2 :

$$F_2 = F_c + F_i \frac{2}{e^{f'\phi} + 1} \quad (13)$$

$$F_2 = 14,36 \text{ [N]}$$

Y con los valores obtenidos de F_1 y F_2 se procede a calcular F_{BY} :

$$F_{BY} = F_1 + F_2 \quad (14)$$

$$F_{BY} = 369,42 \text{ [N]}$$

Una vez que se han calculado todas las fuerzas anteriormente mencionadas se procede a unificarlas en un solo diagrama de cuerpo libre, el cual es detallado a continuación en la figura 2.21.

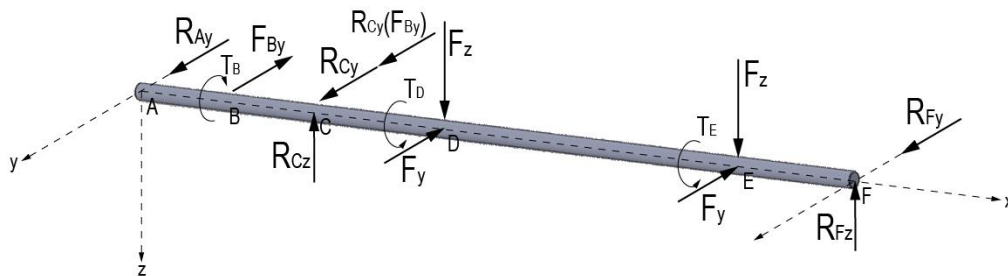


Figura 2.21. Diagrama de cuerpo libre del eje conductor.

Fuente: Propia

Donde:

R_{Ay} = Reacción en el punto A en el eje Y.

F_{By} = Fuerza resultante generada por la polea en el eje Y.

T_B = Torque motriz aplicado en el punto B.

$R_{CY(FBy)}$ = Reacción en el punto C en el eje Y generada por F_{By} .

R_{Cy} = Reacción en el punto C en el eje Y.

R_{Cz} = Reacción en el punto C en el eje Z.

T_D = Torque en el punto D.

F_z = Fuerza generada por el molde en el eje Z.

F_y = Fuerza generada por el molde en el eje Y.

T_E = Torque en el punto E.

R_{Fy} = Reacción en el punto F en el eje Y.

R_{Fz} = Reacción en el punto F en el eje Z.

Análisis de torques

$$\sum T = 0$$

$$T_B - T_D - T_E = 0 \quad (15)$$

$$T_D = T_E$$

$$T_B = 2 * T_D$$

$$T_D = 5,11 [N * m]$$

$$T_E = 5,11 [N * m]$$

Para facilidad de cálculo se ha dividido el eje conductor en dos secciones, la sección A-C que corresponde a la sección en la cual se aplica la fuerza F_{By} y se encuentran los dos apoyos, y la sección C-F en la cual se aplican las fuerzas F_z .

Cálculo de reacciones

Sección A-C

En la figura 2.22 se indican las diferentes fuerzas y reacciones en la sección A-C del eje conductor.

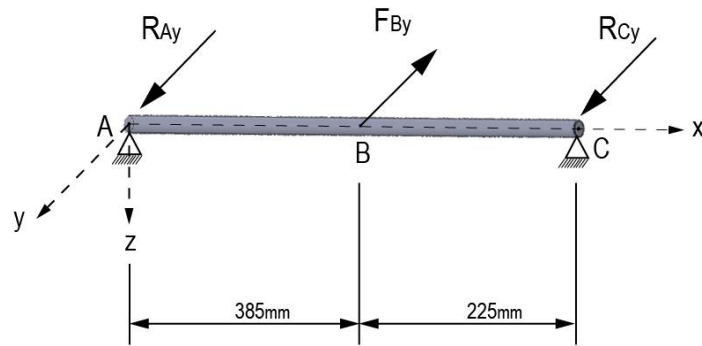


Figura 2.22. Diagrama de cuerpo libre de la sección A-C del eje conductor.

Fuente: Propia

$$\sum M_A = 0 \quad \curvearrowright +$$

$$R_{Cy(FBy)} * (610 [mm]) - F_{By} * (385 [mm]) = 0 \quad (16)$$

$$R_{Cy(FBy)} = 233,16 [N]$$

$$\sum F_y = 0 \quad \nearrow +$$

$$F_{By} = R_{Ay} + R_{Cy} \quad (17)$$

$$R_{Ay} = 136,26 [N]$$

Sección C-F

En la figura 2.23 se indican las diferentes fuerzas y reacciones en la sección C-F del eje conductor.

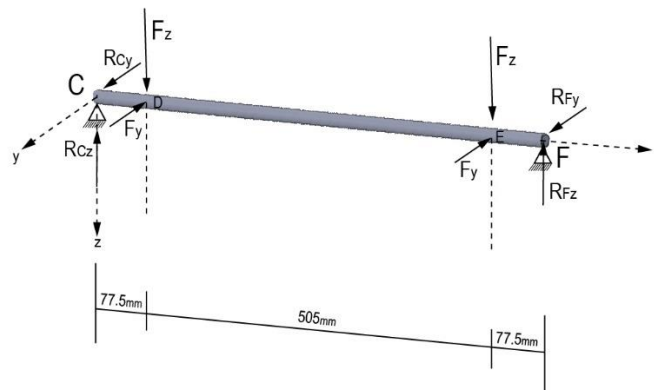


Figura 2.23. Diagrama de cuerpo libre de la sección C-F del eje conductor.

Fuente: Propia

Alrededor del eje Y

$$\sum M_C = 0$$



$$-77,5 [mm] * F_Z - 582,5 [mm] * F_Z + 660 [mm] * R_{FZ} = 0 \quad (18)$$

$$R_{FZ} = 122,62 [N]$$

$$\sum F_Z = 0$$



$$-2 * F_Z + R_{CZ} + R_{FZ} = 0 \quad (19)$$

$$R_{CZ} = 122,62 [N]$$

Alrededor del eje Z

$$\sum M_C = 0$$



$$-77,5 [mm] * F_Y - 582,5 [mm] * F_Y + 660 [mm] * R_{Fy} = 0 \quad (20)$$

$$R_{Fy} = 114,34 [N]$$

$$\sum F_y = 0$$



$$-2 * F_Y + R_{Cy} + R_{Fy} = 0 \quad (21)$$

$$R_{Cy} = 114,34 [N]$$

Análisis de esfuerzos

- Cálculo de esfuerzos en una dirección dada

Para una mejor comprensión se realizará el análisis de esfuerzos en los dos tramos mencionados anteriormente, al tramo A-C y el tramo C-F.

Tramo A-C

En la figura 2.24 se muestran las fuerzas y reacciones presentes en el plano X-Y en la sección A-C del eje conductor.

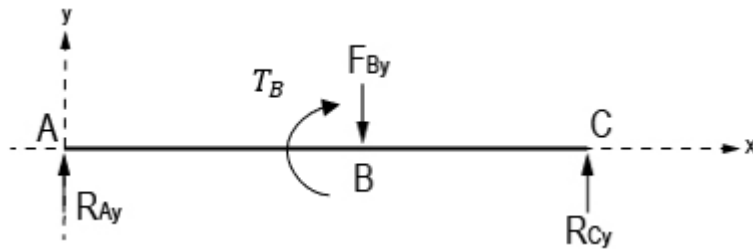


Figura 2.24. Diagrama de cuerpo libre en el plano X-Y de la sección A-C del eje conductor.

Fuente: Propia

A continuación se calcula los esfuerzos normales σ_{xa} y σ_{xm} utilizando las siguientes expresiones, tomando en cuenta que no se corrigen los esfuerzos por que no existe un concentrador de tensión por lo tanto K_f y K_{fs} son igual a 1.

$$\sigma_{xa} = K_f * \frac{32 * M_B}{\pi * d^3} \quad (22)$$

Donde:

σ_x = Esfuerzo amplitud en el eje x.

K_f = Factor de concentrador de esfuerzos.

M_B = Momento en el punto B.

d = Diámetro del eje.

$$\sigma_{xa} = \frac{32 * M_B}{\pi * d^3}$$

Del gráfico se observa que el punto crítico en la sección A-C del eje conductor es el punto B, y es donde se tiene el momento flector más grande, por lo tanto se calculará el esfuerzo en el punto B.

$$M_B = 385 [mm] * R_{Ay} \quad (23)$$

$$M_B = 52461,44 [N * mm]$$

Debido a que no se tiene momento medio se tiene:

$$\sigma_{xm} = K_f * \frac{32 * M_m}{\pi * d^3} \quad (24)$$

$$\sigma_{xm} = 0$$

Los esfuerzos cortantes τ_{xya} y τ_{xym} se calculan como se indica a continuación en la ecuación (25):

$$\tau_{xym} = K_{fs} * \frac{16 * T_m}{\pi * d^3} \quad (25)$$

Donde:

τ_{xy} = Esfuerzo cortante en el plano xy.

K_{fs} = Factor de concentrador de esfuerzos = 1.

$T_m = T_B$ = Torque en el punto B.

d = Diámetro del eje.

Asumimos como torque amplitud un 20% del torque medio.

$$T_a = 0,2 * T_m \quad (26)$$

$$T_a = 2,04 [N * m]$$

Con ayuda de la ecuación (27) calculamos τ_{xya} .

$$\tau_{xya} = \frac{16 * T_a}{\pi * d^3} \quad (27)$$

- Cálculo de esfuerzos principales

Para el cálculo de los esfuerzos principales se utiliza la ecuación (28):

$$\sigma_{1,2a} = \frac{\sigma_{xa} + \sigma_{ya}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xa} - \sigma_{ya}}{2}\right)^2 + \tau_{xya}^2} \quad (28)$$

- Cálculo del esfuerzo ideal equivalente σ'

En el presente trabajo se utiliza la teoría de falla de los materiales de la Energía de distorsión máxima de Von Mises por lo que los esfuerzos ideales equivalentes amplitud y medio se calcula con las ecuaciones (29) y (30) respectivamente.

$$\sigma'_a = \sqrt{\sigma_{1a}^2 - \sigma_{1a}\sigma_{2a} + \sigma_{2a}^2} \quad (29)$$

$$\sigma'_m = \sqrt{\sigma_{1m}^2 - \sigma_{1m}\sigma_{2m} + \sigma_{2m}^2} \quad (30)$$

Donde:

$$\sigma_{1a,2a} = \frac{\sigma_{xa} + \sigma_{ya}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xa} - \sigma_{ya}}{2}\right)^2 + \tau_{xya}^2}$$

Para facilitar la operación entre ecuaciones se reemplazarán los siguientes valores en la ecuación (28):

$$a = \frac{\sigma_{xa} + \sigma_{ya}}{2}$$

$$b = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xa} - \sigma_{ya}}{2}\right)^2 + \tau_{xya}^2}$$

$$\sigma_{1a}^2 = (a + b)^2 = a^2 + 2ab + b^2$$

$$\sigma_{2a}^2 = (a - b)^2 = a^2 - 2ab + b^2$$

$$\sigma_{1a}\sigma_{2a} = (a + b)(a - b) = a^2 - b^2$$

Operando las expresiones indicadas anteriormente se tiene el valor del esfuerzo ideal equivalente σ' :

$$\sigma'_a = \sqrt{\sigma_{xa}^2 + 3\tau_{xya}^2} \quad (31)$$

De manera semejante se encuentra:

$$\sigma'_m = \sqrt{\sigma_{xm}^2 + 3\tau_{xym}^2} \quad (32)$$

- Modelo matemático del diámetro de un eje trabajando a fatiga

Se ensambla toda la información obtenida anteriormente en una sola ecuación, utilizando el criterio de falla a la fatiga de ASME – elíptica con la ecuación (33) tomada del libro de Shigley [10] indicada a continuación:

$$\left(\frac{n * \sigma_a}{S_e}\right)^2 + \left(\frac{n * \sigma_m}{S_{yt}}\right)^2 = 1 \quad (33)$$

Reemplazando valores en la ecuación (31) tenemos:

$$\sigma'_a = \sqrt{\sigma_{xa}^2 + 3\tau_{xya}^2} = \sqrt{\left(K_f \frac{32 * M_a}{\pi * d^3}\right)^2 + 3 \left(K_{fs} \frac{16 * T_a}{\pi * d^3}\right)^2}$$

$$\sigma'_a = \frac{32}{\pi * d^3} \sqrt{(K_f * M_a)^2 + \frac{3}{4} (K_{fs} T_a)^2} \quad (34)$$

De manera semejante se encuentra σ'_m :

$$\sigma'_m = \frac{32}{\pi * d^3} \sqrt{(K_f * M_m)^2 + \frac{3}{4} (K_{fs} T_m)^2} \quad (35)$$

Reemplazando los esfuerzos σ'_a y σ'_m en la ecuación (33) de la teoría de falla a la fatiga de ASME – elíptica se tiene:

$$d = \left(\left(\frac{32n}{\pi} \right) \sqrt{\left(\frac{K_f * M_a}{S_e} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{K_{fs} * T_a}{S_e} \right)^2 + \left(\frac{K_f * M_m}{S_{yt}} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{K_{fs} * T_m}{S_{yt}} \right)^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (36)$$

Para el cálculo del valor de S_e se utiliza la expresión (37):

$$S_e = 0,5 S_{ut} k_a k_b k_c k_d k_e k_f \quad (37)$$

Donde:

S_e = límite de resistencia a la fatiga.

k_a = factor de modificación de la condición superficial

k_b = factor de modificación del tamaño

k_c = factor de modificación de la carga

k_d = factor de modificación de la temperatura

k_e = factor de confiabilidad

k_f = factor de modificación de efectos varios

S_{ut} = Límite de resistencia última a la tensión.

Factor de modificación de la condición superficial k_a

Este factor se lo calcula utilizando la ecuación (38) presentada a continuación:

$$k_a = a S_{ut}^b \quad (38)$$

Los valores de a y de b se obtienen de la tabla 2.14 presentada a continuación y el valor de Sut se obtiene de la tabla 2.13.

Tabla 2.13. Coeficientes de resistencia para acero inoxidable.

Resistencia (a la tensión)				
Norma	Material	Condición	Fluencia S_{yt} [MPa]	Última S_{ut} [MPa]
AISI 303	Acero Inoxidable	Recocido	530	601

Fuente: "Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley" [10]

Tabla 2.14. Factores a y b para cálculo de k_a .

Acabado superficial	Factor a		Exponente b
	Sut, kpsi	Sut, MPa	
Esmerilado	1,34	1,58	-0,085
Maquinado o laminado en frío	2,70	4,51	-0,265
Laminado en caliente	14,4	57,7	-0,718
Como sale de la forja	39,9	272	-0,995

Fuente: "Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley" [10]

Para nuestro material tenemos un acabo superficial maquinado por lo tanto los valores son: $a = 4,51$ y $b = - 0,265$

$$k_a = 4,51 (601)^{-0,265}$$

$$k_a = 0,827$$

Factor de modificación del tamaño k_b

Para el cálculo del factor de modificación del tamaño k_b , se toman en cuenta las expresiones de la figura 2.26 presentada a continuación:

$$k_b = \begin{cases} (d/0.3)^{-0.107} = 0.879d^{-0.107} & 0.11 \leq d \leq 2 \text{ pulg} \\ 0.91d^{-0.157} & 2 < d < 10 \text{ pulg} \\ (d/7.62)^{-0.107} = 1.24d^{-0.107} & 2.79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \\ 1.51d^{-0.157} & 51 < d \leq 254 \text{ mm} \end{cases}$$

Figura 2.26. Diagrama de fuerza cortante y momento flector del eje.

Fuente: "Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley" [10]

Se selecciona la ecuación marcada con rojo debido a que el eje de la máquina de colado centrífugo horizontal tendrá un diámetro entre los límites indicados y para el cálculo se estima un valor de 40 mm.

$$k_b = 1,24d^{-0,107} \quad (39)$$

$$k_b = 1,24 (40 [mm])^{-0,107}$$

$$k_b = 0,835$$

Factor de modificación de la carga k_c

Según Shigley [10], el factor de carga para un eje sometido a esfuerzos combinados es 1 por lo tanto:

$$k_c = 1$$

Factor de modificación de la temperatura k_d

El valor del factor de modificación de la temperatura se lo obtiene utilizando la expresión (40), y tomando el valor de la tabla 2.15 correspondiente a la temperatura de funcionamiento del eje, definida por Gómez y Jami [2], la cual es de 300 °C.

Tabla 2.15. Valores de S_T/S_{RT} , según la temperatura de funcionamiento.

Temperatura, °C	S_T/S_{RT}	Temperatura, °F	S_T/S_{RT}
100	1,020	100	1,008
200	1,020	300	1,024
300	0,975	500	0,995
400	0,900	700	0,927
500	0,768	1000	0,698

Fuente: "Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley" [10]

$$k_d = \frac{S_T}{S_{RT}} \quad (40)$$

$$k_d = 0,975$$

Factor de confiabilidad k_e

Para una confiabilidad del 99% se tiene un factor de confiabilidad de 0,814.

$$k_e = 0,814$$

Factor de modificación de efectos varios k_f

Para el eje de la máquina de colado centrífugo horizontal el factor de efectos varios será igual a 1, debido a que no existen concentradores de tensiones

$$k_f = 1$$

Una vez obtenidos todos los valores de los factores k, se calcula S_e con la ecuación (37).

$$S_e = 0,5 S_{ut} k_a k_b k_c k_d k_e k_f$$

$$S_e = 164,68 [MPa]$$

Se procede al cálculo del diámetro del eje para el tramo A-C utilizando la ecuación (36).

Tramo A-C

$$M_a = M_B = 52461,44 [N * mm]$$

$$M_m = 0$$

$$T_m = T_B = 10,22 [N * m]$$

$$T_a = 0,2 * T_m = 2,04 [N * m]$$

$$K_f = K_{fs} = 1 \text{ (No existen concentradores de esfuerzo)}$$

$$S_{yt} = 530 [MPa]$$

$$S_e = 164,68 [MPa]$$

$$n = 4 \text{ (Asumiendo el valor de 4)}$$

$$d = \left(\left(\frac{32n}{\pi} \right) \sqrt{ \left(\frac{K_f * M_a}{S_e} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{K_{fs} * T_a}{S_e} \right)^2 + \left(\frac{K_f * M_m}{S_{yt}} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{K_{fs} * T_m}{S_{yt}} \right)^2 } \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$d = 23,5 \text{ [mm]}$$

El diámetro para la sección del eje A-C es igual a 23,5 milímetros.

Tramo C-F

En la figura 2.25 se muestran las fuerzas y reacciones presentes en la sección A-F del eje conductor.

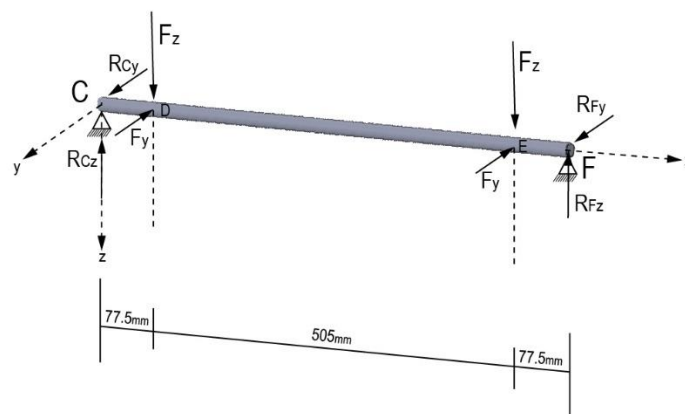


Figura 2.25. Diagrama de cuerpo libre de la sección A-F del eje conductor.

Fuente: Propia

Para el cálculo de las reacciones utilizaremos el valor de la fuerza F, por lo tanto obtendremos valores de reacciones totales en los puntos C y F.

Donde:

$$F = \frac{P}{4 * \text{Sen}(\beta)}$$

$$F = \frac{490,5 \text{ [N]}}{4 * \text{Sen}(37^\circ)}$$

$$F = 167,66 \text{ [N]}$$

Y de la geometría obtenemos:

$$\sum M_C = 0 \quad + \quad \curvearrowright$$

$$-77,5 * F - 582,5 * F + 660 * R_F = 0 \quad (41)$$

$$R_F = 167,66 [N]$$

$$\sum F_V = 0 \quad \uparrow +$$

$$R_C - F - F + R_F = 0 \quad (42)$$

$$R_C = 167,66 [N]$$

De la geometría se deduce que el punto E es el punto crítico en la sección del eje C-F, por lo tanto se calcula el momento en el punto E.

$$M_E = R_F * 77,5 \quad (43)$$

$$M_E = 12993,65 [N * mm]$$

Cálculo del factor de concentración del esfuerzo K_f y K_{fs}

El eje al presentar dos cuñeros, se debe calcular el factor de concentración del esfuerzo por fatiga y se lo denomina K_f para flexión y K_{fs} para torsión y se los calcula con las expresiones (44) y (45) respectivamente.

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) \quad (44)$$

$$K_{fs} = 1 + q_{cortante}(K_{ts} - 1) \quad (45)$$

Considerando un análisis conservador se tiene que $K_t = 2,2$ para flexión y $K_{ts} = 3,0$ para torsión, como indica a continuación la tabla 2.16 para un cuñero fresado con una relación $r/d=0,02$.

Tabla 2.16. Estimaciones de primera iteración de los factores de concentración del esfuerzo K_t .

	Flexión	Torsión	Axial
Filete de hombro: Agudo ($r/d=0,02$)	2,7	2,2	3,0
Filete de hombro: Bien redondeado ($r/d=0,1$)	1,7	1,5	1,9
Cuñero fresado ($r/d=0,02$)	2,2	3,0	-
Cuñero de patín o trapezoidal	1,7	-	-
Ranura para nillo de retención	5,0	3,0	5,0

Fuente: "Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley" [10]

$$K_t = 2,2$$

$$K_{ts} = 3,0$$

Donde:

K_t = Factor de concentración de esfuerzos para flexión.

K_{ts} = Factor de concentración de esfuerzos para torsión.

Con la ayuda de las figuras 2.26 y 2.27 se obtienen los valores de q y $q_{cortante}$ respectivamente:

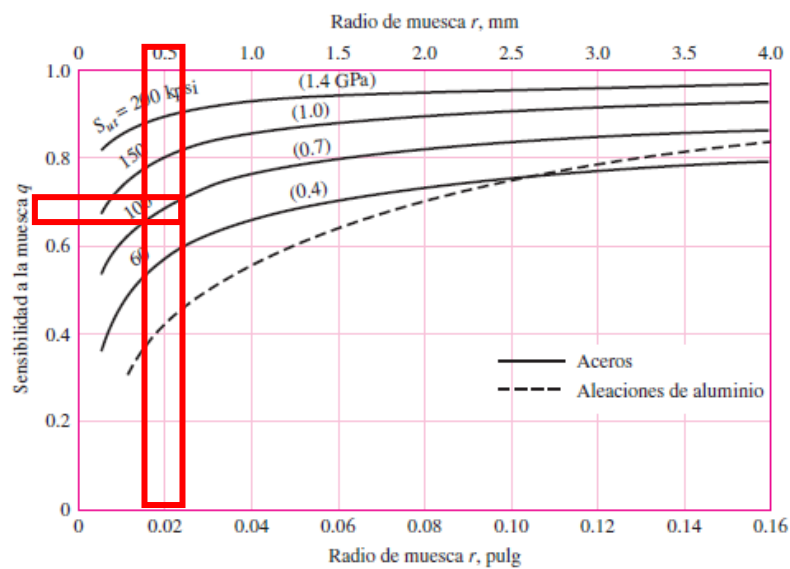


Figura 2.26. Diagrama de sensibilidad a la muesca q vs radio de la muesca r .

Fuente: : "Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley " [10]

$$q = 0,65$$

Reemplazando los valores de K_t y q en la expresión (44) tenemos:

$$K_f = 1 + q(K_t - 1)$$

$$K_f = 1 + 0,65(2,2 - 1)$$

$$K_f = 1,78$$

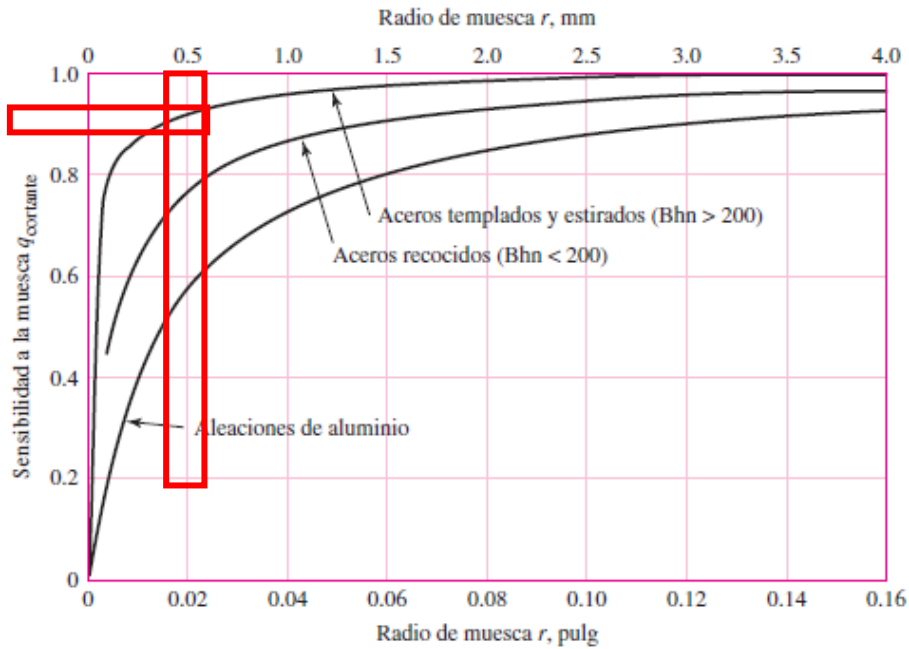


Figura 2.27. Diagrama de sensibilidad a la muesca $q_{cortante}$ vs radio de la muesca r .
Fuente: : “Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley ” [10]

$$q_{cortante} = 0,9$$

Reemplazando los valores de $q_{cortante}$ y K_{ts} en la expresión (45) tenemos:

$$K_{fs} = 1 + q_{cortante}(K_{ts} - 1)$$

$$K_{fs} = 1 + 0,9(3 - 1)$$

$$K_{fs} = 2,8$$

Por lo tanto para el cálculo del diámetro del eje en el tramo C-F se tiene:

$$M_a = M_E = 12993,65 [N * mm]$$

$$M_m = 0$$

$$T_m = T_B = 10,22 [N * m]$$

$$T_a = 0,2 * T_m = 2,04 [N * m]$$

$$S_{yt} = 530 [MPa]$$

$$S_e = 164,68 [MPa]$$

$$n = 4 \text{ (Asumiendo el valor de 4)}$$

$$K_f = 1,78$$

$$K_{fs} = 2,8$$

Reemplazando todos los valores obtenidos en la ecuación (36) para calcular el diámetro según ASME – elíptica tenemos:

$$d = \left(\left(\frac{32n}{\pi} \right) \sqrt{ \left(\frac{K_f * M_a}{S_e} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{K_{fs} * T_a}{S_e} \right)^2 + \left(\frac{K_f * M_m}{S_{yt}} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{K_{fs} * T_m}{S_{yt}} \right)^2 } \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$d = 17,88 \text{ [mm]}$$

Una vez obtenidos los valores del diámetro para las secciones AC igual a 23,5 mm y el diámetro para la sección CF de 17,88 mm, se escoge el mayor diámetro para el eje, en este caso el eje deberá tener un diámetro mínimo de 23,5 mm.

Por cuestiones de fabricación se opta por un eje de diámetro de 25,4 mm ya que es el que se comercializa en el mercado ecuatoriano.

2.1.11. Cálculo de rodamientos para el soporte del eje conductor

A continuación se presenta el procedimiento de cálculo de los rodamientos que estarán en las chumaceras que soportan y fijan el eje conductor en la estructura de la máquina de colado centrífugo horizontal. Para el dimensionamiento de los rodamientos se utilizará el punto C del eje conductor debido a que es el punto en donde inciden la mayor cantidad de fuerzas, siendo por tanto el punto que deberá soportar una mayor carga.

- Carga dinámica C

Para el cálculo de la carga dinámica C, se utilizan las expresiones indicadas en el catálogo de rodamientos FAG [11], que se muestran a continuación:

$$C = \left(\frac{f_L}{f_n * f_t} \right) * P \quad (46)$$

Donde:

C= Carga Dinámica. [kN]

f_L = Factor de esfuerzos dinámicos = 5 (Para hornos giratorios)

f_n = Factor de Velocidad = 0,303 (a 1200 RPM)

f_t = Factor de Temperatura = 1

P = Carga dinámica equivalente.

Se utiliza un diseño en base a cargas dinámicas debido a que el eje alcanza velocidades superiores a las 100 RPM.

Para el cálculo de P se utiliza la ecuación (47), mostrada a continuación:

$$P = X * F_r + Y * F_a \quad (47)$$

Donde F_r y F_a corresponden a las fuerzas radiales y axiales respectivamente que están actuando sobre el rodamiento. En el caso del eje conductor tenemos el siguiente esquema tomado de la figura 2.21:

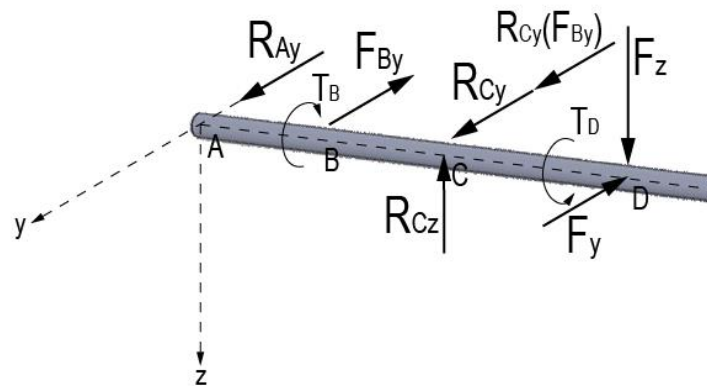


Figura 2.21. Diagrama de cuerpo libre del eje conductor.

Fuente: Propia

Del cual deducimos:

$$F_{rz} = R_{Cz}$$

$$F_{ry} = R_{Cy} + R_{Cy}(F_{By})$$

$$F_a = 0$$

$$F_r = \sqrt{F_{rz}^2 + F_{ry}^2}$$

$$F_r = 0,368 \text{ [kN]}$$

De la página 148 del catálogo de rodamientos FAG se obtiene los valores de X y Y indicados a continuación:

$$X = 1$$

$$Y = 0$$

Por lo tanto reemplazando valores en la ecuación (47) se obtiene el valor de P.

$$P = 0,368 [kN]$$

Y con el valor de P, se reemplazan valores en la ecuación (46) para obtener el valor de la Carga Dinámica C.

$$C = \left(\frac{5}{0,303 * 1} \right) * 0.368$$

$$C = 6 [kN]$$

Con el valor de la carga dinámica C se busca en el catálogo de rodamientos FAG el tipo de rodamiento que soporte esta carga C, el mismo que corresponde a un rodamiento de la serie 6201 de un diámetro de 12 milímetros, pero por facilidad de construcción se selecciona un rodamiento de un diámetro de 1 pulgada, dimensión del eje conductor, el cuál es un rodamiento de la serie 6005 adecuado para nuestra aplicación.

2.1.12. Diseño de Rodetes Conductores

Para definir las dimensiones de los rodets conductores se tomaron en cuenta factores como la temperatura a la cual estarán sometidos y las dimensiones estándar de los ejes disponibles en el mercado ecuatoriano. El eje, al tener una dimensión de 1 pulgada de diámetro, se consideró que las dimensiones de los rodets conductores deben tener un diámetro de 3 pulgadas por cuestiones de estética, siendo seleccionado un eje de acero AISI 1045, un acero con un porcentaje medio de carbono que posee una alta resistencia, ideal para las condiciones de funcionamiento de la máquina de colado centrífugo horizontal. Adicional a eso se realizó un análisis en Solidworks cuyos resultados fueron favorables ya que confirmó que los rodets no fallarán en ninguna circunstancia. En la figura 2.28 y en la tabla 2.17 se muestran los resultados de la simulación.

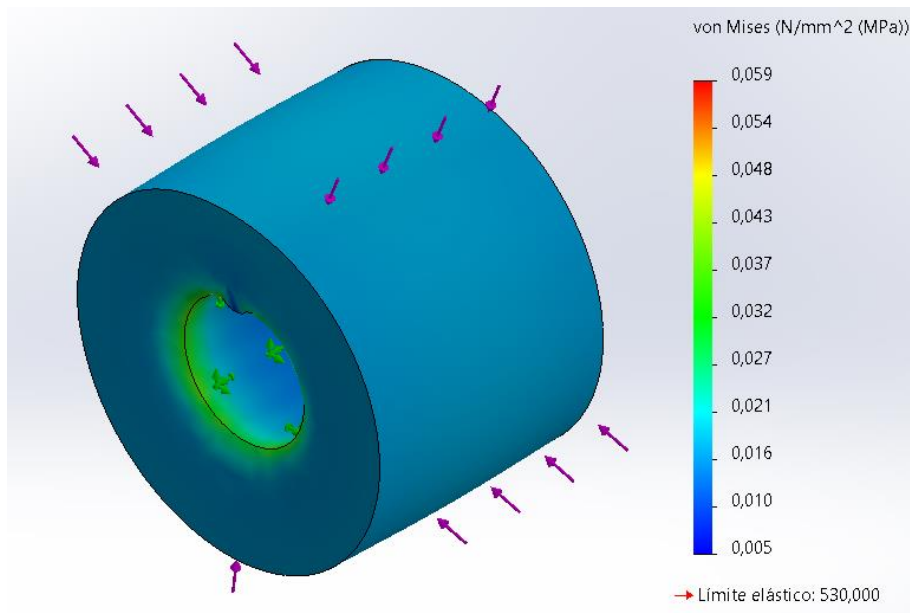


Figura 2.28. Distribución del esfuerzo y deformación del rodete conductor.

Fuente: Propia

Tabla 2.17. Resultados simulación del rodete conductor.

Limite Elástico	530 [MPa]
Esfuerzo Máximo	0,059 [MPa]
Esfuerzo Mínimo	0,005 [MPa]

Fuente: Propia.

2.1.13. Diseño de Rodetes Conducidos

Para dimensionar los rodetes conducidos se tomó en cuenta la misma dimensión del diámetro exterior de los rodetes conductores con la diferencia de que los rodetes conductores estaban anclados al eje conductor mediante una chaveta. Por esa razón fue necesario el diseño de un sistema de soporte el cual se presenta en la figura 2.29. Este debe resistir el rodete conducido y el peso del molde. El sistema está formado por un soporte el cual será fabricado con una lámina de acero ASTM A36, el rodete conducido tendrá el mismo material del rodete conductor el cual es acero AISI 1045 así como su misma dimensión, un rodamiento que permitirá la libre rotación de la rueda, y contará con un pasador y un retén para asegurar el rodamiento en el interior del rodete conducido.

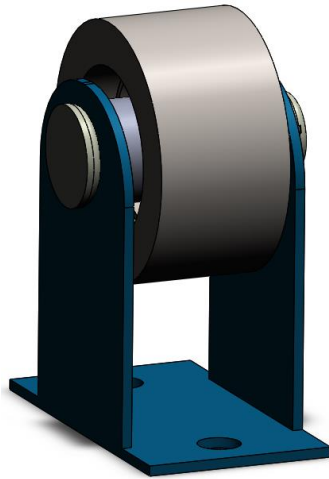


Figura 2.29. Sistema rodete conducido.

Fuente: Propia

Un punto importante de este sistema es la resistencia que debe tener el pasador y las láminas de acero que forman la estructura, ya que estos serán los elementos que soporten el peso del molde. Por esta razón a continuación se presenta una simulación de ambos elementos en Solidworks, el cual garantiza su resistencia.

- Pasador

El pasador al igual que los rodetes será construido con acero AISI 1045, y deberá soportar el valor de la fuerza F igual a 167,66 [N] la cual actuará en el centro del pasador cuyo diámetro será de 1 pulgada similar al diámetro del eje de acero inoxidable.

En la figura 2.30 se observa la distribución de la fuerza que ejerce el peso del molde en el pasador y posteriormente en la figura 2.31 se muestra la distribución del esfuerzo y la deformación del pasador, resumiendo los valores obtenidos en la tabla 2.18.

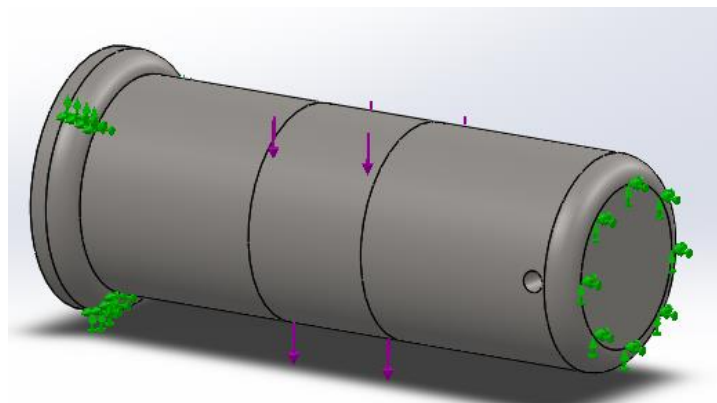


Figura 2.30. Distribución de fuerzas en pasador del rodete conducido.

Fuente: Propia

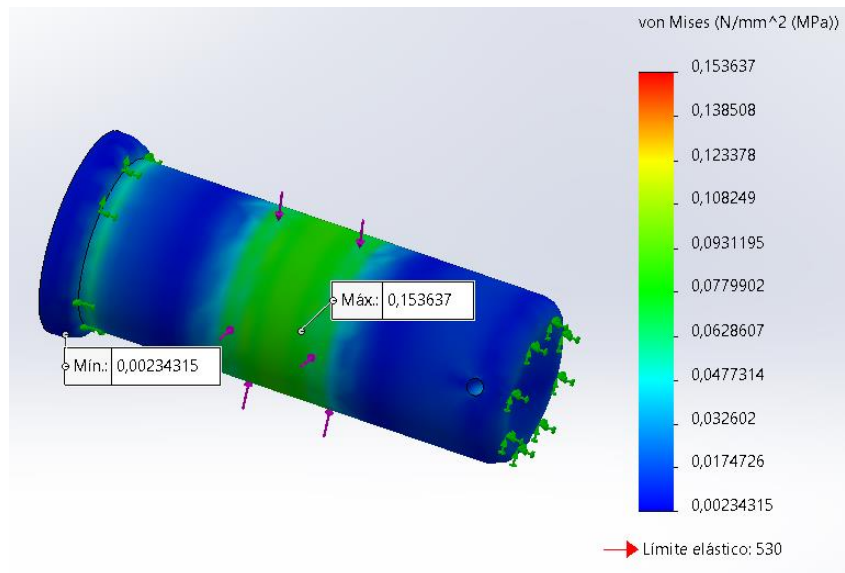


Figura 2.31. Distribución del esfuerzo y deformación del pasador del rodete conducido.

Fuente: Propia

Como se puede observar en la figura 2.31, el valor máximo del esfuerzo cortante es de 0,11 [MPa] muy similar a los 0,12 [MPa] y a su vez estos valores son muy inferiores al valor de 530 [MPa] que corresponde al valor del límite elástico garantizando que no existirá ninguna falla en el pasador.

Tabla 2.18. Resultados simulación del pasador del rodete conducido.

Limite Elástico	530 [MPa]
Esfuerzo Máximo	0,11 [MPa]
Esfuerzo Mínimo	0,0017 [MPa]

Fuente: Propia.

- Estructura

Para el cálculo del esfuerzo que soportará la estructura de acero ASTM A36 se tomará en cuenta la fuerza ejercida por el molde que es 122,5 [N], como la carga está ubicada simétricamente se dividirá para 2 ya que el pasador es el elemento que recibirá esta fuerza directamente y este a su vez está apoyado en sus dos extremos soportando así una carga de 61,25 [N] en cada extremo. En la figura 2.32 y 2.33 se muestra la distribución de cargas en la estructura y la distribución de esfuerzo y deformación respectivamente.

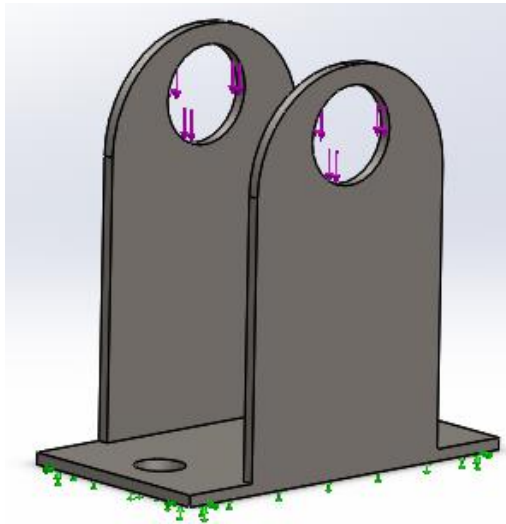


Figura 2.32. Distribución de fuerzas en la estructura del rodete conducido.

Fuente: Propia

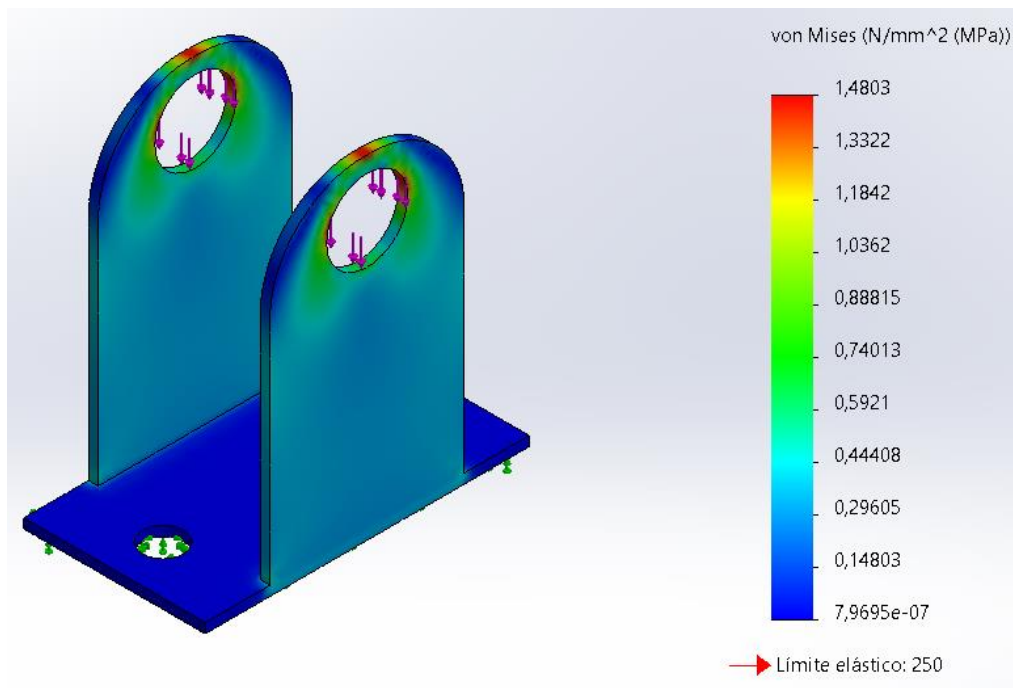


Figura 2.33. Distribución del esfuerzo y deformación de la estructura del rodete conducido.

Fuente: Propia

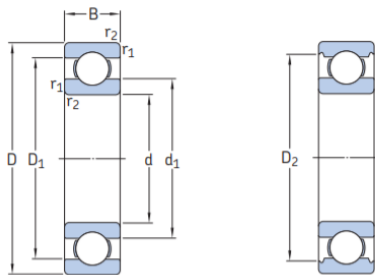
Tabla 2.19. Resultados simulación de la estructura del rodete conducido.

Limite Elástico	250 [MPa]
Esfuerzo Máximo	1,4803 [MPa]
Esfuerzo Mínimo	0,000000796 [MPa]

Fuente: Propia.

- Selección del rodamiento del rodete conducido

Para la selección del rodamiento del rodete conducido se utilizará el catálogo de la reconocida marca SKF para un eje de diámetro 52 [mm] que corresponde a 1 pulgada que es el valor del diámetro del pasador, y un diámetro exterior de 52 [mm], valor del diámetro interior que tiene el rodete conducido. A continuación en la figura 2.34 se presenta la tabla correspondiente a rodamientos rígidos, que serán los que se utilizarán para este sistema, y que nos indica que el rodamiento que se usará es el 6205.



Dimensiones principales			Capacidad de carga básica		Carga límite de fatiga	Velocidades nominales		Masa	Designación
d	D	B	dinámica C	estática C ₀	P _u	Velocidad de referencia	Velocidad límite		
mm			kN		kN	r. p. m.		kg	-
25	37	7	4,1	2,6	0,125	38 000	24 000	0,022	61805
	42	9	7,02	4,3	0,193	36 000	22 000	0,045	61905
	47	8	8,06	4,75	0,212	32 000	20 000	0,06	‡ 16005
	47	12	11,9	6,55	0,275	32 000	20 000	0,078	‡ 6005
	52	15	14,8	7,8	0,335	28 000	18 000	0,13	‡ 6205
28	52	15	17,8	9,8	0,4	28 000	18 000	0,12	6205 ETN9
	62	17	23,4	11,6	0,49	24 000	16 000	0,23	‡ 6305
	62	17	26	13,4	0,57	24 000	16 000	0,22	6305 ETN9
	80	21	35,8	19,3	0,815	20 000	13 000	0,54	6405
	58	16	16,8	9,5	0,405	26 000	16 000	0,17	62/28
30	68	18	25,1	13,7	0,585	22 000	14 000	0,3	63/28
	42	7	4,49	2,9	0,146	32 000	20 000	0,025	61806
	47	9	7,28	4,55	0,212	30 000	19 000	0,049	61906
	55	9	11,9	7,35	0,31	28 000	17 000	0,089	‡ 16006
	55	13	13,8	8,3	0,355	28 000	17 000	0,12	‡ 6006
35	62	16	20,3	11,2	0,475	24 000	15 000	0,2	‡ 6206
	62	16	23,4	12,9	0,54	24 000	15 000	0,18	6206 ETN9
	72	19	29,6	16	0,67	20 000	13 000	0,35	‡ 6306
	72	19	32,5	17,3	0,735	22 000	14 000	0,33	6306 ETN9
	90	23	43,6	23,6	1	18 000	11 000	0,75	6406
35	47	7	4,36	3,35	0,14	30 000	18 000	0,029	61807
	55	10	10,8	7,8	0,325	26 000	16 000	0,08	61907
	62	9	13	8,15	0,375	24 000	15 000	0,11	‡ 16007
	62	14	16,8	10,2	0,44	24 000	15 000	0,15	‡ 6007
	72	17	27	15,3	0,655	20 000	13 000	0,29	‡ 6207
35	72	17	31,2	17,6	0,75	20 000	13 000	0,26	6207 ETN9
	80	21	35,1	19	0,815	19 000	12 000	0,46	‡ 6307
	100	25	55,3	31	1,29	16 000	10 000	0,97	6407

Figura 2.34. Catálogo rodamientos SKF.

Fuente: SKF [12]

2.1.14. Diseño del sistema guiador

El sistema guiador mostrado en la figura 2.35, estará compuesto por distintos componentes que permiten absorber la carga generada por el movimiento radial del molde. Dicha carga será absorbida por un resorte que estará dentro del sistema guiador.

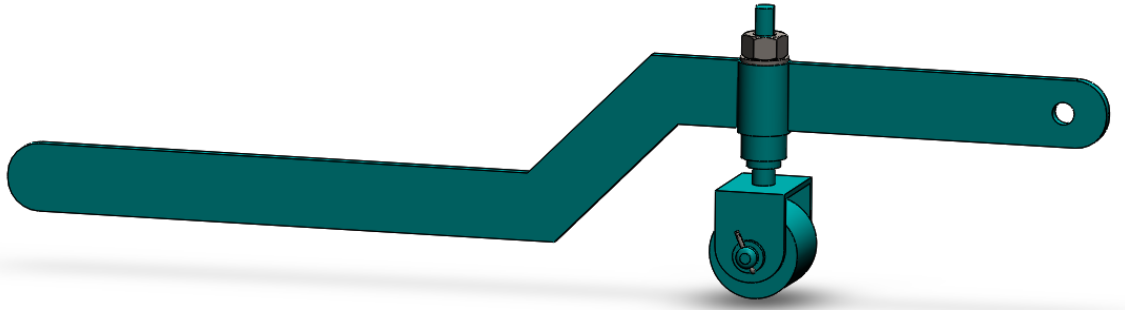


Figura 2.35. Sistema guiador.

Fuente: Propia

Para poder entender el principio de funcionamiento del guiador se presenta un despiece en la figura 2.36, el cual nos muestra todos los elementos que confirman este sistema.

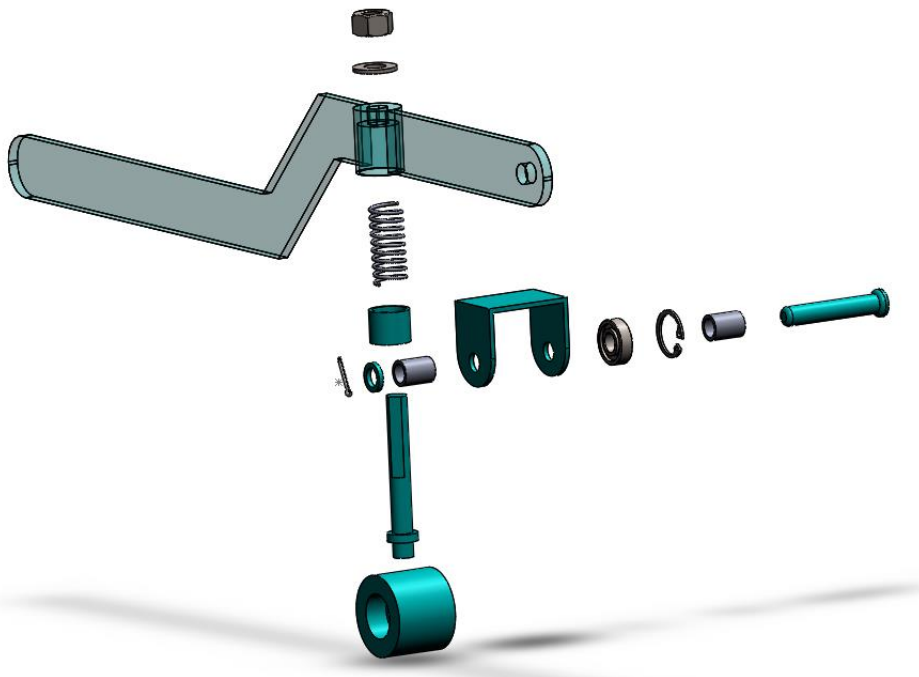


Figura 2.36. Despiece del sistema guiador.

Fuente: Propia

Los elementos principales de este sistema son:

- Barra de soporte rígida.
- Bocín con resorte interior.
- Eje roscado.
- 2 Bocines fijador de rodete.
- Rodete superior.
- Rodamiento.
- Pasador.
- Pernos, arandelas y elementos de fijación.

La barra de soporte rígida será fabricada de una plancha de acero ASTM A36 de espesor $\frac{1}{4}$ de pulgada, la cual será anclada a la estructura de la máquina de colado centrífugo horizontal. Los bocines fijadores serán los encargados de que el rodete superior no tenga un movimiento axial, además el eje roscado irá por el interior del resorte que será el que absorberá las cargas generadas por el movimiento radial y será asegurado con un perno y una arandela en la parte superior de la barra de soporte como se muestra en la figura 2.37. Por lo tanto el sistema guiador deberá estar en contacto con la pista central del molde sin generar una carga adicional a éste dando una sensación de mayor seguridad al operar la máquina de colado centrífugo horizontal.

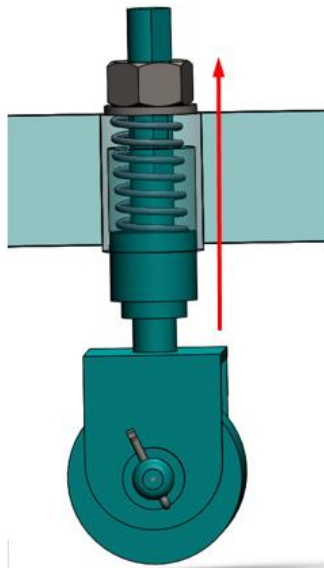


Figura 2.37. Vista interior del sistema guiador.

Fuente: Propia

Cabe recalcar que el rodamiento para el rodete superior fue seleccionado tomando en cuenta las dimensiones de éste. Tomando los valores del pasador que tiene un diámetro de 12 [mm], y un diámetro máximo de 28 [mm], utilizando el catálogo de rodamientos SKF correspondiente a los valores indicados en la figura 2.38 se selecciona el rodamiento 6001.

Dimensiones principales			Capacidad de carga básica		Carga límite de fatiga	Velocidades nominales		Masa	Designación
d	D	B	dinámica C	estática C ₀	P _u	Velocidad de referencia	Velocidad límite		
mm			kN		kN	r. p. m.		kg	-
12	21	5	1,74	0,915	0,039	70 000	43 000	0,0063	61801
	24	6	2,91	1,46	0,062	67 000	40 000	0,011	61901
	28	8	5,4	2,36	0,1	60 000	38 000	0,021	* 6001
	30	8	5,07	2,36	0,1	60 000	38 000	0,026	16101
	32	10	7,28	3,1	0,132	50 000	32 000	0,037	* 6201
	37	12	10,1	4,15	0,176	45 000	28 000	0,06	* 6301
15	24	5	1,9	1,1	0,048	60 000	38 000	0,0065	61802
	28	7	4,36	2,24	0,095	56 000	34 000	0,016	61902
	32	8	5,85	2,85	0,12	50 000	32 000	0,03	* 16002
	32	9	5,85	2,85	0,12	50 000	32 000	0,03	* 6002
	35	11	8,06	3,75	0,16	43 000	28 000	0,045	* 6202
	42	13	11,9	5,4	0,228	38 000	24 000	0,082	* 6302
17	26	5	2,03	1,27	0,054	56 000	34 000	0,0075	61803
	30	7	4,62	2,55	0,108	50 000	32 000	0,016	61903
	35	8	6,37	3,25	0,137	45 000	28 000	0,038	* 16003
	35	10	6,37	3,25	0,137	45 000	28 000	0,038	* 6003
	40	12	9,95	4,75	0,2	38 000	24 000	0,065	* 6203
	40	12	11,4	5,4	0,228	38 000	24 000	0,064	6203 ETN9
20	47	14	14,3	6,55	0,275	34 000	22 000	0,11	* 6303
	62	17	22,9	10,8	0,455	28 000	18 000	0,27	6403
	32	7	4,03	2,32	0,104	45 000	28 000	0,018	61804
	37	9	6,37	3,65	0,156	43 000	26 000	0,037	61904
	42	8	7,28	4,05	0,173	38 000	24 000	0,05	* 16004
	42	12	9,95	5	0,212	38 000	24 000	0,067	* 6004
22	47	14	13,5	6,55	0,28	32 000	20 000	0,11	* 6204
	47	14	15,6	7,65	0,325	32 000	20 000	0,098	6204 ETN9
	52	15	16,8	7,8	0,335	30 000	19 000	0,14	* 6304
	52	15	18,2	9	0,38	30 000	19 000	0,14	6304 ETN9
	72	19	30,7	15	0,64	24 000	15 000	0,41	6404
	50	14	14	7,65	0,325	30 000	19 000	0,13	62/22
56	16	18,6	9,3	0,39	28 000	18 000	0,18	63/22	

Figura 2.38. Catálogo rodamientos SKF.

Fuente: SKF [12]

Una vez descrito todo el proceso de rediseño de la máquina de colado centrífugo horizontal, se presenta a continuación en la figura 2.39 el ensamblaje de los nuevos componentes del sistema en el cual se puede observar el eje conductor con los rodetes conductores, los rodetes conducidos y el seguidor en la parte superior, modelo el cuál se procederá a construir.

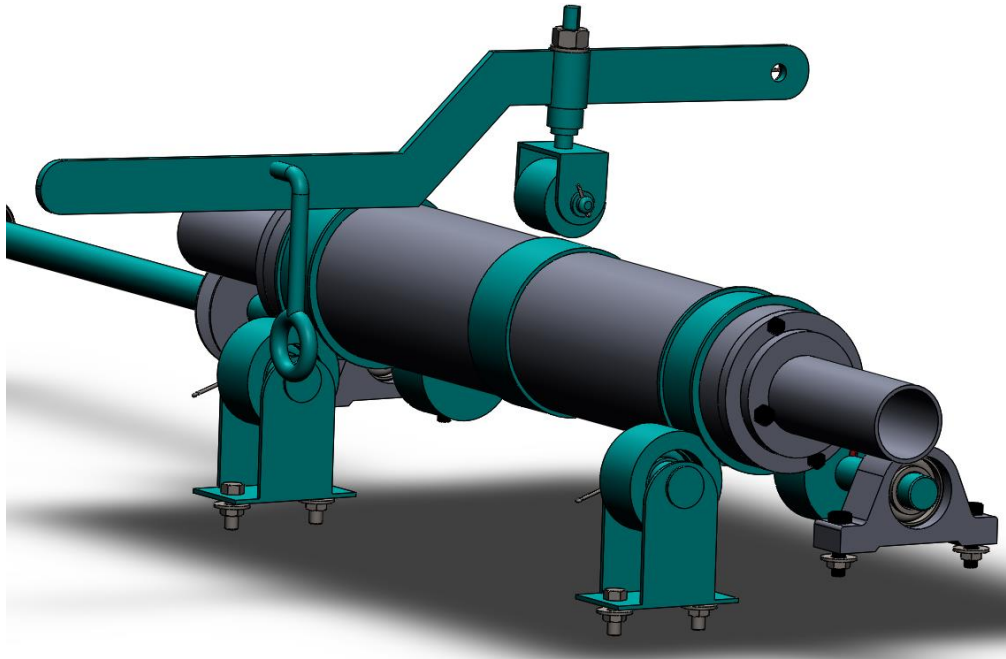


Figura 2.39. Nuevo diseño de la máquina de colado centrífugo horizontal.

Fuente: Propia

2.2. Ensamblaje de nuevos elementos mecánicos

Para el ensamblaje de los nuevos elementos mecánicos se abordarán los subsistemas de la máquina de colado centrífugo horizontal correspondientes a: Transmisión de movimiento eje – molde y Apoyo del molde como un solo subsistema, simplificando así elementos innecesarios y facilitando el ensamblaje de la máquina.

2.2.1. Ensamblaje del molde y sus componentes

A continuación en la figura 2.40 se muestra el estado inicial del molde de la máquina de colado centrífugo horizontal, en el cual podemos observar que el molde se encontraba unido a presión a dos chumaceras de rodamientos cónicos usadas a nivel industrial, las mismas que al calentarse producían vapores nocivos para la salud y derrames de su lubricante, siendo este uno de los principales motivos por el cual fue necesario su rediseño. Así mismo en el centro del molde se encontraba un engranaje el cual era parte del sistema de transmisión eje - molde y estaba unida al molde mediante canales hechos por torneado.



Figura 2.40. Estado inicial del Molde de la máquina de colado centrífugo horizontal.

Fuente: Propia

Para realizar el ensamblaje de los elementos mecánicos que conforman el nuevo sistema en primer lugar fue necesario quitar los elementos del sistema antiguo. El molde es el elemento en el cual se basó el rediseño del nuevo sistema así que es el único elemento que será reutilizado.

Como siguiente punto se realizó el proceso de cilindrado del molde en un torno para retirar los canales utilizados para fijar el engranaje. Este proceso se muestra en la figura 2.41. Esto a su vez sirvió para controlar que el diámetro externo del molde era el mismo en toda su longitud y tener un balance adecuado.



Figura 2.41. Torneado del molde de la máquina de colado centrífugo horizontal.

Fuente: Propia

Una vez terminado el cilindrado del molde, se procede a la fabricación de las pistas las mismas que serán realizadas mediante un proceso de cilindrado interno en un eje de

acero 1045 definido anteriormente, este proceso toma su tiempo ya que se debe retirar demasiado material. Este proceso se lo puede observar en la figura 2.42.



Figura 2.42. Proceso de cilindrado interno para obtención de pistas del molde.

Fuente: Propia

Una vez obtenidas las pistas y haber preparado las dimensiones del molde se procede a colocarlas a presión como se muestra en la figura 2.43.



Figura 2.43. Molde y pistas ensambladas.

Fuente: Propia

2.2.2. Ensamblaje del eje conductor

El eje de transmisión es otro elemento que fue modificado, debido a que el eje antiguo presentaba un cambio de sección necesario para colocar el engranaje conductor que formaba parte del antiguo sistema de transmisión como se muestra en la figura 2.44, de esta manera fue reemplazado por un eje de acero inoxidable de 1 pulgada de diámetro igual que el original pero sin el cambio de sección.



Figura 2.44. Eje antiguo con cambio de sección.

Fuente: Propia

Al nuevo eje se le colocaron la polea menor como se muestra en la figura 2.45 (a) y las tres chuceras figura 2.45 (b) que formaban parte del eje anterior ya que servirán para la transmisión de la fuerza proveniente del motor y de apoyo para el eje respectivamente. Además se hicieron ranuras para las chavetas que permitirán la transmisión de movimiento a los rodetes conductores los mismos que serán asegurados con tornillos prisioneros para evitar que los mismos se desplacen a lo largo del eje mostrado en la figura 2.45 (c).



Figura 2.45. Elementos anclados al eje. a) Polea menor, b) Chumaceras y c) Rodetes conducidos.

Fuente: Propia

2.2.3. Ensamblaje del sistema de rodetes conducidos

En el punto 2.1.13 se explicó el principio que tendrían los rodetes conducidos, por lo que los bocines retenedores, cada pasador y los mismos rodetes fueron obtenidos mediante procesos de cilindrado en un torno todos utilizando el mismo acero 1045, el rodamiento 6245 calculado en el punto anterior. A su vez el soporte fue obtenido mediante el proceso de corte por hilo de una lámina ASTM A36 de 3 centímetros de espesor. En la figura 2.46 (a) se muestra el rodete conducido y en la figura 2.46 (b) se muestra el sistema completo.

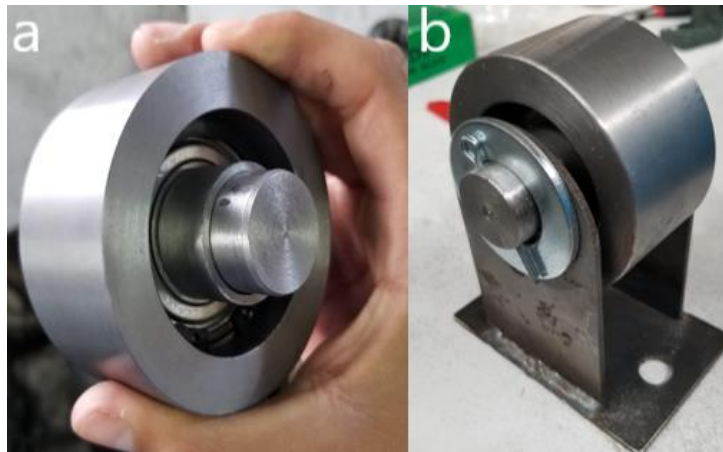


Figura 2.46. a) Sistema de rodamiento, b) Sistema Rodete Conducido

Fuente: Propia

2.2.4. Ensamblaje del sistema guidor

Para la palanca del sistema guidor y la estructura que soporta el rodete superior se utilizaron dos planchas de acero ASTM A36 de $\frac{1}{4}$ de pulgada y 3 milímetros de espesor respectivamente, estas fueron sometidas al proceso de corte por hilo para lograr la geometría deseada como se muestra a continuación en la figura 2.47.



Figura 2.47. Proceso de corte por hilo

Fuente: Propia

Así mismo los bocines y el eje roscado fueron realizados por procesos de torneado, y adicionalmente mediante elementos de ajuste y sujeción como pernos, arandelas y pasadores tenemos el sistema guiador completo. Cabe recalcar que el sistema guiador está formado por un sistema muy similar al de los rodets conducidos pero con un rodete de menor dimensión. A continuación en la figura 2.48 se muestran las partes que conforman este sistema.

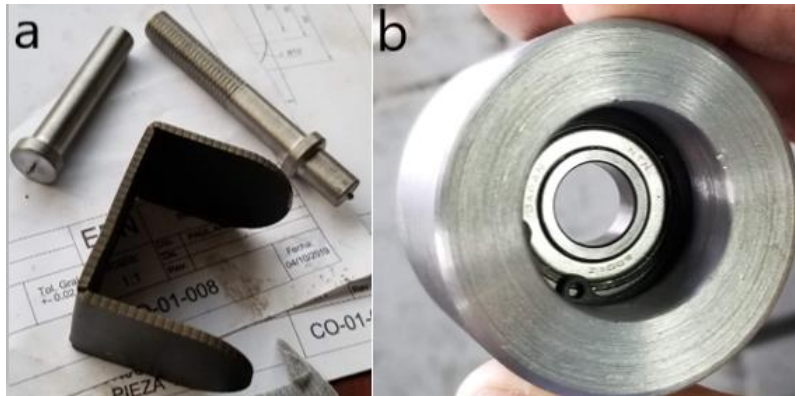


Figura 2.48. a) Elementos del sistema guiador. b) Rodete superior

Fuente: Propia

2.3. Materiales y equipos utilizados para la fundición de tubo de aluminio.

Para realizar una correcta fundición de aluminio se ha tomado en cuenta el trabajo de Garrido y Sánchez en su trabajo “Determinación de la Metodología para la Obtención de Aleaciones de Aluminio de Fundiciones Maquinables sin Porosidades” [13], el cual nos recomienda el uso de tres materiales muy importantes los cuales son: la materia prima del aluminio, fundente y desgasificante.

2.3.1. Materia Prima

La materia prima para la obtención de tubos de aluminio es obtenida principalmente a partir de chatarra de aluminio la cual en su mayoría son perfiles de aluminio y aluminio de fundiciones previas realizadas en el laboratorio de fundición de la Escuela Politécnica Nacional como se ve en la figura 2.49, el mismo que corresponde a las aleaciones de aluminio 6005 y 6063. Se utilizarán 5 Kg de chatarra de aluminio para la fundición de cada tubo, cantidad determinada por Gómez y Jami [2].



Figura 2.49. Chatarra de aluminio utilizada para fundir tubos de aluminio.

Fuente: Propia

2.3.2. Fundente

Se utilizó el fundente Alu Fundex Extra, este fundente ha sido utilizado con frecuencia en las fundiciones de aluminio realizadas en el laboratorio de fundición de la Escuela Politécnica Nacional, según [13] se ha podido conocer que este fundente es un fundente de limpieza, el cual reduce la oxidación de la colada y evita la absorción de gases, el cual minimiza la formación de poros en la fundición final. La cantidad de fundente recomendada para la fundición de tubos de aluminio corresponde al 0,5% del peso de la cantidad de aluminio el cual en este caso corresponde a 25 gramos.

2.3.3. Desgasificante

Se usaron pastillas desgasificantes de aluminio denominadas Apartagas, el cual según Garrido y Sánchez [13], se debe utilizar un 0,25% del peso del aluminio a fundir en el caso de utilizar chatarra de aluminio y un 0,15% si se utiliza lingotes de aluminio. Dado esto se determina que para fundir 5 Kg de aluminio se deben utilizar 12,5 gramos de desgasificante. Se debe añadir el desgasificante inmediatamente después de haber sido añadido el fundente, esto se lo debe realizar envolviendo el desgasificante en papel aluminio y sumergirlo hasta el fondo de la colada y después de transcurrido 1 minuto agitarla para que las impurezas puedan ser retiradas con la escoria.

2.3.4. Antiadherente para el molde

Se utilizó grafito en polvo el cual es colocado en el interior del molde y evita que al solidificarse el tubo aluminio se adhiera al molde y este se pueda extraer con facilidad.

2.3.5. Horno de crisol a gas

El horno de crisol a gas del laboratorio de fundición de la Escuela Politécnica Nacional el cual se muestra en la figura 2.50, es utilizado para la fundición de aluminio debido a sus dimensiones y a su capacidad máxima de 9 kilogramos que lo hace ideal para esta aplicación.



Figura 2.50. Horno de crisol a gas.

Fuente: Propia

2.3.6. Tacómetro Digital

Se utilizó un tacómetro digital láser como se indica en la figura 2.51, cuya función es medir la velocidad de rotación. En este caso se lo utilizó para medir la velocidad de rotación del molde de la máquina coladora centrífuga y ajustarlo a las revoluciones indicadas anteriormente ya que es un parámetro de suma importancia para la correcta obtención de los tubos de aluminio.



Figura 2.51. Tacómetro digital.

Fuente: Propia

El tacómetro digital tiene un rango de medición de 2,5 a 99999 RPM el cual lo hace ideal para este tipo de aplicaciones.

2.3.7. Multímetro y Termocupla

El multímetro y la termocupla son utilizados para medir la temperatura de la colada, es importante controlar este parámetro ya que una temperatura de la colada menor a la indicada puede ser el causante de la formación de defectos en el tubo de aluminio. La termocupla utilizada es una termocupla del tipo K la cual se sumergirá en el crisol y el valor de la temperatura saldrá directamente en la pantalla del multímetro, tomando así una medida directamente de la colada. Esta termocupla tiene un rango de medición desde los -100 hasta los 1000 °C por lo que está cubierta por una vaina que la protege de temperaturas muy elevadas. En la figura 2.52 se muestra el multímetro digital utilizado.



Figura 2.52. Multímetro digital.

Fuente: <https://bit.ly/3bZkdAH>

2.3.8. Pirómetro

El pirómetro es un instrumento que se utilizó para medir la temperatura exterior del molde de la máquina coladora centrífuga. Esto debido a que en el transcurso del proceso de colado se debe controlar la temperatura de precalentamiento del molde, para de esta manera evitar la formación de defectos en el tubo de aluminio que se obtendrá. El pirómetro utilizado es de marca IRT206 como se muestra en la figura 2.53 y tiene un rango de medición de temperatura de -20 hasta los 320 °C.



Figura 2.53. Pirómetro IRT206.

Fuente: Propia

2.3.9. Máquina de colado centrífugo horizontal

La máquina de colado centrífugo horizontal como se muestra en la figura 2.54, fue producto de un rediseño, debido a que durante el proceso de colado se presentaban graves problemas, los cuales fueron causantes de la inhabilitación de la misma. Todo el proceso de rediseño fue detallado en el punto 2.2 llamado “Ensamblaje de nuevos elementos mecánicos”.



Figura 2.54. Máquina de colado centrífugo horizontal.

Fuente: Propia

2.4. Parámetros de Funcionamiento.

Este trabajo de titulación se apoya en el trabajo titulado “Estudio paramétrico del Proceso de Colado Centrífugo Horizontal para la Obtención de Tubos de Aluminio”, realizado por Gómez y Jami [2] en el año 2017, el cual consistió en obtener los parámetros óptimos de funcionamiento de la máquina de colado centrífugo horizontal indicados en la tabla 2.20, los mismos que fueron tomados como referencia al momento de realizar las pruebas en la máquina modificada teniendo un resultado muy satisfactorio.

Tabla 2.20. Parámetros de funcionamiento óptimos de la máquina de colado centrífugo horizontal.

Parámetros de Funcionamiento	
Temperatura de Pre calentamiento	165 [°C]
Temperatura de Colado	801 [°C]
Temperatura promedio del molde	165 – 500 [°C]
Velocidad de rotación del molde	1198 [rpm]

2.5. Preparación y puesta en marcha de la máquina de colado centrífugo horizontal.

Antes de la puesta en marcha de la máquina de colado centrífugo horizontal se la debe preparar, es por esta razón que a continuación se presentan los pasos q se deben seguir para un correcto funcionamiento.

2.5.1. Preparación de la máquina de colado centrífugo horizontal

Para que exista un correcto colado y obtener tubos de aluminio con una buena calidad se deben seguir los siguientes pasos:

- Se debe realizar una correcta limpieza y proceder a aplicar grafito en la superficie interior del molde, esto para asegurar que al momento de finalizar el proceso de colado no se presenten inconvenientes al momento de retirar el tubo del molde.
- Se verifica que las tapas laterales del molde se encuentren correctamente aseguradas, esto para evitar que al momento del colado no existan fugas de aluminio las cuales pueden causar un accidente grave al operario.
- Preparar 5 kilogramos de chatarra de aluminio en el crisol del horno y empezar con el proceso de fundición. Cuando el aluminio se encuentre completamente en estado líquido y a una temperatura de 801 °C, agregar 25 gramos de fundente Alu Fundex Extra y proceder a escoriar la colada. Finalmente agregar 12,5 gramos de desgasificante Apartagas y escoriar una última ocasión.

2.5.2. Puesta en marcha de la máquina de colado centrífugo horizontal

Una vez verificado el cumplimiento de los puntos mencionados anteriormente se procede a realizar el proceso de encendido y colado en la máquina:

- Encender la máquina de colado centrífugo horizontal a baja velocidad, encendiendo de igual manera la hornilla de precalentamiento y asegurando el molde con el sistema guiador.
- Precalentar el embudo de colado utilizando el flameador a gas, de esta manera se reduce el choque térmico al colar el aluminio.
- Una vez alcanzada la temperatura de precalentamiento del molde de 165 °C y a su vez tener la colada lista, se procede a aumentar la velocidad de rotación del molde hasta los 1198 rpm es decir hasta que el variador de frecuencia marque 42 Hz y disminuir la intensidad de la hornilla que precalienta el molde.

- Colar el aluminio vertiéndolo a través del embudo de manera uniforme. Retirar inmediatamente el embudo del compartimiento de la máquina para así evitar que este se adhiera al tubo de aluminio y tener complicaciones al momento de extraer el tubo del molde.
- Una vez concluido el colado dejar solidificar el aluminio manteniendo el molde a la misma velocidad de rotación de 1198 rpm durante 30 segundos, después de transcurrido este tiempo disminuir progresivamente la velocidad de rotación y apagar la máquina.
- Quitar las tapas laterales y retirar el tubo de aluminio del molde utilizando guantes de protección.

2.6. Aplicación de Ensayos No Destructivos

Para poder verificar la calidad superficial de los tubos de aluminio obtenidos por medio de la máquina coladora centrífuga horizontal se procede a la aplicación de los ensayos no destructivos de inspección visual y de tintas penetrantes, los mismos que fueron realizados en el Laboratorio de Ensayos No Destructivos de la Escuela Politécnica Nacional. A continuación se detallará los procedimientos realizados a tres tubos de aluminio.

2.6.1. Inspección Visual (VT)

El procedimiento utilizado para la aplicación del ensayo no destructivo de inspección visual (VT) es el siguiente:

- Se toman fotografías correspondientes al estado superficial y estructural de las tres tuberías de aluminio, utilizando como referencia una regla calibrada junto a cada una de ellas para de esta manera tener una referencia dimensional.
- Se toma el dato de temperatura ambiental inicial que corresponde a 22 °C.
- Con ayuda del radiómetro del laboratorio de ENDS se procede a la medición de la intensidad de luz en el área en el que se va a realizar el ensayo correspondiente a 2500 lux.
- Se realiza una limpieza completa de la superficie a inspeccionar utilizando el líquido E-59A Cleaner & Remove y bajo el procedimiento de inspección revisado y aprobado por el laboratorio de Ends.
- Se procede con la toma de fotografías.
- Se divide la probeta en zonas de estudio, para de esta manera facilitar la ubicación de discontinuidades en el informe. En primer lugar se divide a la tubería en tres partes iguales separadas con 120° entre sí y posteriormente se

divide estas tres zonas en tres partes notadas como A, B y C, con las siguientes longitudes A de 170 mm, B de 170 mm y C de 180 mm aproximadamente. En la figura 2.55 se muestra un esquema representativo de la división mencionada.

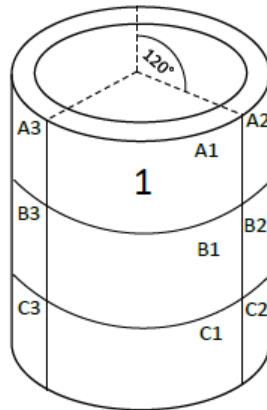


Figura 2.55. Esquema de división de tuberías para inspección visual.

Fuente: Propia

- Se empezó la inspección verificando la parte dimensional de las tuberías, la rectitud, concavidad y convexidad para después continuar con la identificación de discontinuidades que en el caso de encontrarlas se señala su ubicación con un rotulador metálico y se toma fotografías nuevamente.
- Para terminar se toman medidas de las dimensiones de todas las discontinuidades con ayuda de galgas, reglas calibradas y calibradores para su posterior registro documental.

2.6.2. Líquidos Penetrantes (PT)

El procedimiento utilizado para la aplicación del ensayo no destructivo de líquidos penetrantes (PT) es el siguiente:

- Se toman fotografías correspondientes al estado superficial y estructural de las tres tuberías de aluminio, utilizando como referencia una regla calibrada junto a cada una de ellas para de esta manera tener una referencia dimensional.
- Se toma el dato de temperatura ambiental inicial que corresponde a 22 °C.
- Con ayuda del radiómetro del laboratorio de ENDS se procede a la medición de la intensidad de luz en el área en el que se va a realizar el ensayo correspondiente a 2800 lux.

- Se realiza una limpieza completa de la superficie a inspeccionar utilizando el líquido E-59A Cleaner & Remove y bajo el procedimiento de inspección revisado y aprobado por el laboratorio de Ends.
- Se procede con la toma de fotografías.
- Se divide la probeta en zonas de estudio, para de esta manera facilitar la ubicación de discontinuidades en el informe. En primer lugar se divide a la tubería en tres partes iguales separadas con 120° entre sí y posteriormente se divide estas tres zonas en tres partes notadas como A, B y C, con las siguientes longitudes A de 170 mm, B de 170 mm y C de 180 mm aproximadamente.
- Se empezó la inspección verificando la parte dimensional de las tuberías, la rectitud, concavidad y convexidad para después continuar con la identificación de discontinuidades que en el caso de encontrarlas se señala su ubicación con un rotulador metálico y se toma fotografías nuevamente.
- Se aplicó el líquido penetrante y se esperó un total de 12 minutos en que este ingrese en la tubería.
- Se realizó una limpieza del exceso de penetrante utilizando nuevamente el líquido E-59A Cleaner & Remove y un paño húmedo de algodón dando pases suaves y en una sola dirección.
- Se roció una sola capa de revelador D-70 Nonaqueous Developer a una distancia de 15 cm y un ángulo de 45° con respecto a la horizontal.
- Al aplicar el revelador se pudo observar como el penetrante sale a la superficie de la tubería.
- Se toman fotografías de todas las discontinuidades que presentan manchas de penetrante en la superficie y se procede a la medición de estas con ayuda de galgas, reglas calibradas y calibradores para su posterior registro documental.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de las fundiciones de prueba realizadas a la máquina de colado centrífugo horizontal así como también de los ensayos no destructivos realizados a las tuberías de aluminio obtenidas.

3.1. Fundición de prueba

Se realizaron un total de 5 fundiciones de prueba en la máquina de colado centrífugo horizontal, estas fueron necesarias para comprobar el correcto funcionamiento y la

solución de posibles problemas que pudieran presentarse ya sea en las tuberías obtenidas o en los elementos nuevos de la máquina.

Con estas pruebas se pudo constatar que los problemas que por los que fue necesario plantear este proyecto de rediseño fueron solucionados en su totalidad y su operación no pone en riesgo a ninguna persona que esté a cargo de su operación.

Una vez constatado esto, se procedió a realizar cinco fundiciones de prueba y una vez obtenidas las tuberías se procedió a seleccionar los mejores tres ejemplares tomando en cuenta la calidad superficial que presentaba cada uno de ellos, en la figura 3.1 se muestra a la primera tubería obtenida.



Figura 3.1. Tubería obtenida por colado centrifugo.

Fuente: Propia

Un aspecto que no se debe pasar por alto es que por densidad, en las tuberías formadas por un proceso de centrifugado todas las impurezas se desplazan hacia el interior, haciendo que el interior de las tuberías tengan un aspecto muy rugoso como se puede observar en la figura 3.2, pero a su vez es una ventaja ya que mediante un proceso de mecanizado se puede retirar en su gran mayoría estas impurezas y obtener una calidad superficial muy aceptable en el interior de las tuberías.



Figura 3.2. Superficie interior de la tubería obtenida por colado centrifugo.

Fuente: Propia

Dados estos resultados fue necesario el análisis de las tuberías por ensayos no destructivos, ya que se busca llevar un control documentado de la calidad superficial de las tuberías obtenidas.

3.2. Resultados obtenidos en los Ensayos No Destructivos

A continuación se presentan los resultados obtenidos por los ensayos no destructivos de inspección visual y líquidos penetrantes realizados a los mejores tres ejemplares de las cinco tuberías obtenidas en las pruebas de la máquina de colado centrífugo horizontal, las cuales fueron obtenidas de la fundición 1, 3 y 5, por lo que las tuberías llevarán la denominación de P1, P3 y P5 respectivamente.

3.2.1. Resultados del ensayo de inspección visual (VT)

Como se indicó en el procedimiento se dividió a cada tubería en diferentes secciones además de que los reportes de la inspección visual están en el ANEXO 2.

- Tubería P1

En la figura 3.3, 3.4 y 3.5 se muestran los defectos encontrados en la tubería P1 los cuales son tabulados en la tabla 3.1.



Figura 3.3. Inspección visual de la sección A de la tubería P1.

Fuente: Propia

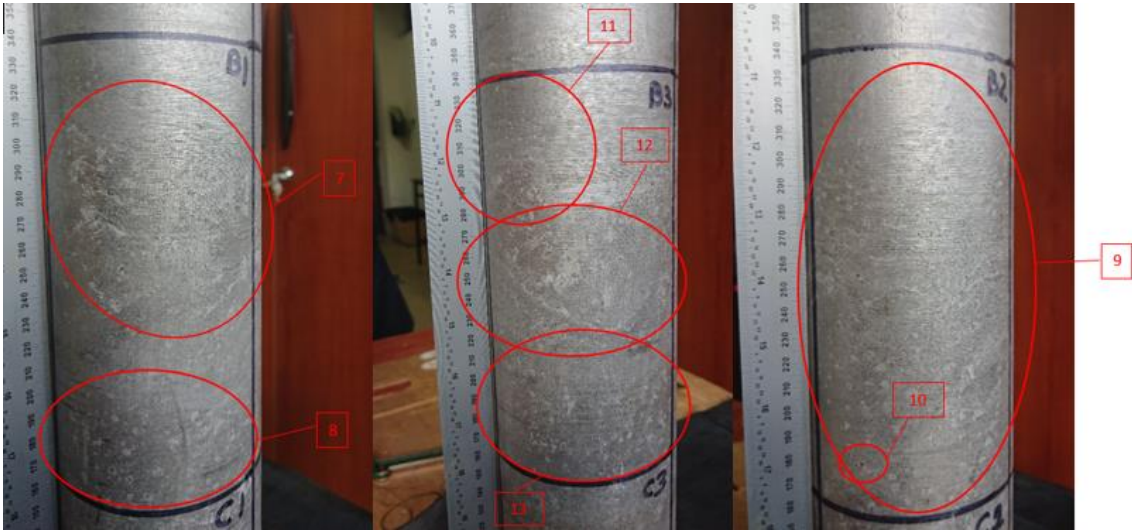


Figura 3.4. Inspección visual de la sección B de la tubería P1.

Fuente: Propia

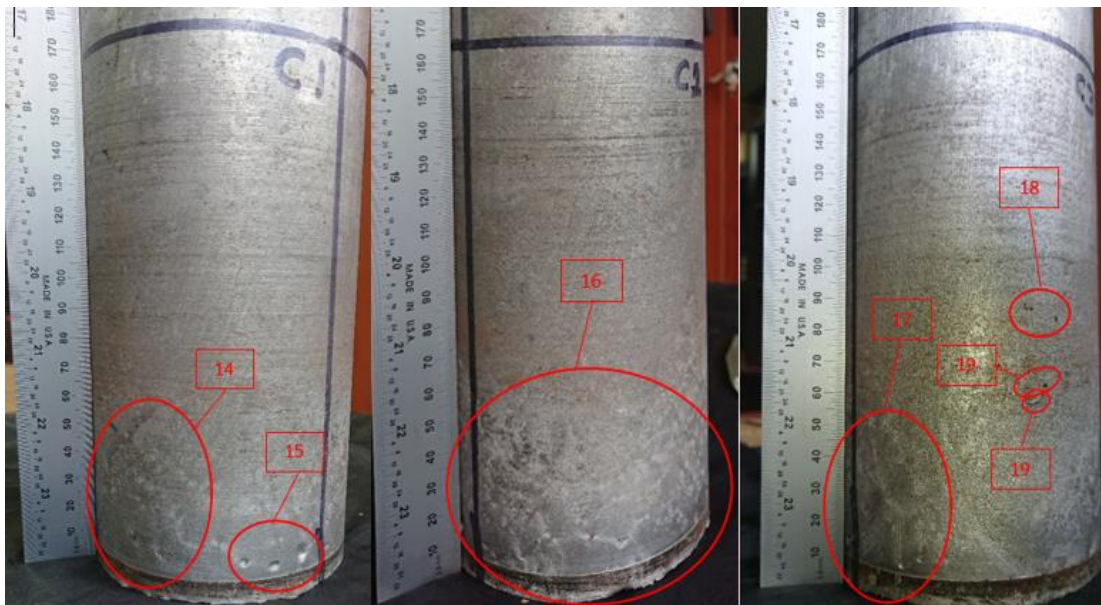


Figura 3.5. Inspección visual de la sección C de la tubería P1.

Fuente: Propia

Tabla 3.1. Defectos en la tubería P3.

Identificación de Discontinuidades				
Nº De Discontinuidad	Zona	Tipo De Discontinuidad	Dimensión (mm)	Profundidad (mm)
1	A1	Contracción de material	5,02	1
2	A1	Contracción de material	4,72	1
3	A1	Agrupación de poros $\varnothing < 1$ mm	55,36	NA
4	A2	Rugosidad extrema y descascaramiento de material	178,62	NA
5	A3	Rugosidad excesiva	112,31	NA
6	A3	Contracciones del material	3,02	<1
			2,71	<1
			1,67	<1
7	B1	Rugosidad excesiva	110,24	<1
8	B1	Rugosidad excesiva	88,63	<1
9	B2	Rugosidad excesiva	164,36	<1
10	B2	Poros	<1	<1
11	B3	Agrupación de poros $\varnothing < 1$ mm	73,82	<1
12	B3	Zonas de traslape debido a un mal enfriamiento	90 mm	NA
13	B3	Agrupación de poros $\varnothing < 1$ mm	86,43	<1
14	C1	Agrupación de poros $\varnothing < 1$ mm	62,48	<1
15	C1	Contracciones	\varnothing 1,02	<1
			\varnothing 2,61	<1
			\varnothing 3,57	<1
16	C2	Agrupación de poros $\varnothing < 1$ mm	76,24	<1
17	C3	Agrupación de poros $\varnothing < 1$ mm	62,37	<1
18	C3	Agrupación de poros $\varnothing < 1$ mm	1	<1
19	C3	Agrupación de poros $\varnothing < 1$ mm	1	<1
20	C3	Fisura	7	NA

- Tubería P3

En la figura 3.6, 3.7 y 3.8 se muestran los defectos encontrados en la tubería P1 los cuales son tabulados en la tabla 3.2.

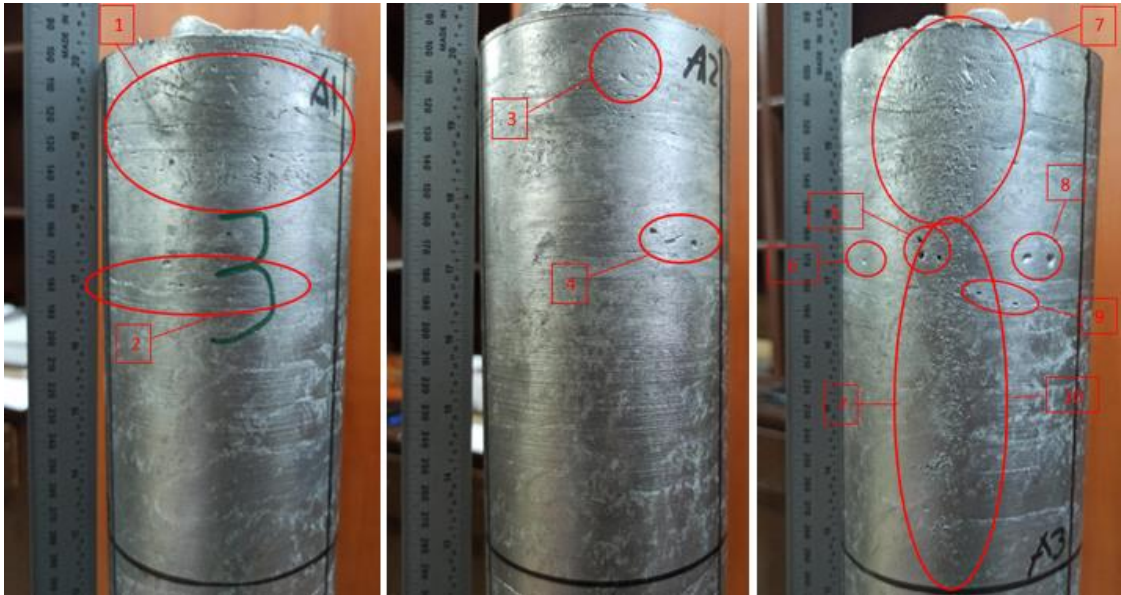


Figura 3.6. Inspección visual de la sección A de la tubería P3.

Fuente: Propia

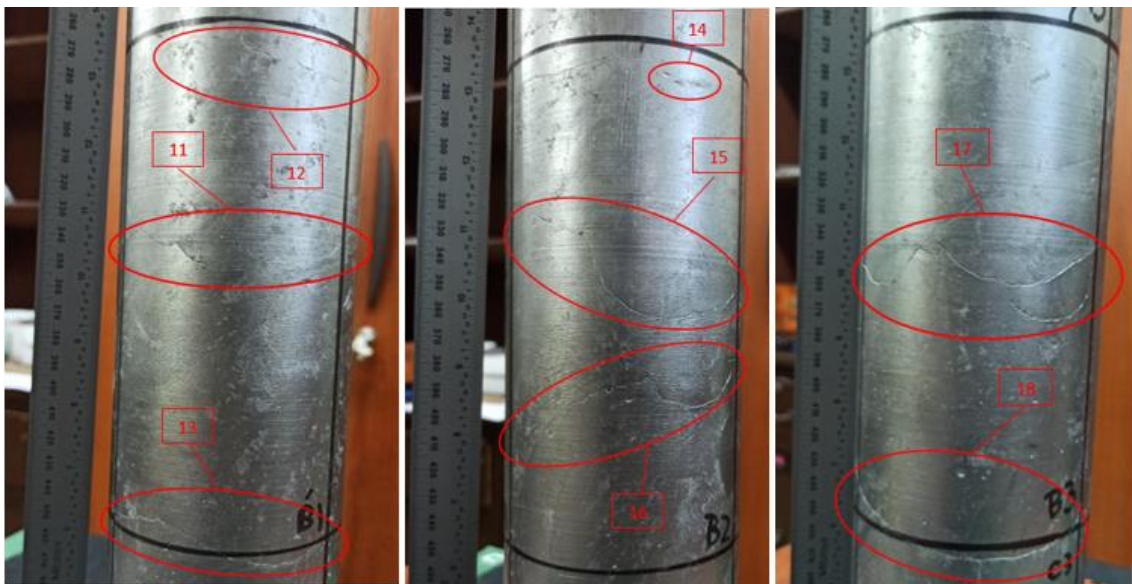


Figura 3.7. Inspección visual de la sección B de la tubería P3.

Fuente: Propia

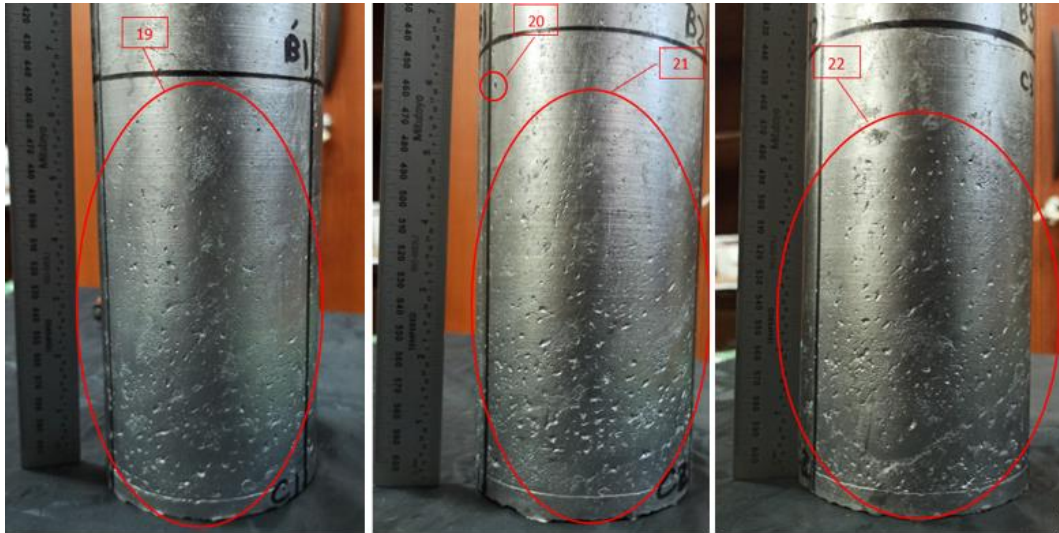


Figura 3.8. Inspección visual de la sección C de la tubería P3.

Fuente: Propia

Tabla 3.2. Defectos en la tubería P3.

Identificación de Discontinuidades				
N° De Discontinuidad	ZONA	Tipo De Discontinuidad	Dimensión (mm)	Profundidad (mm)
1	A1	Zonas de traslape debido a un mal enfriamiento	56,72	NA
2	A1	Zonas de traslape debido a un mal enfriamiento	64,71	NA
3	A2	Poros $\varnothing < 3,5$ mm Poros $\varnothing < 2,8$ mm	26,29	NA
4	A2	Poros $\varnothing < 1,4$ mm Poros $\varnothing < 2,6$ mm Poros $\varnothing < 1,7$ mm	34,71	NA
5	A3	Poros $\varnothing < 1,1$ mm Poros $\varnothing < 1,4$ mm Poros $\varnothing < 1,2$ mm	17,41	<1
6	A3	Poros $\varnothing < 1,1$ mm	1,1	<1
7	A3	Rugosidad excesiva	82,36	<1
8	A3	Poros $\varnothing < 3,1$ mm Poros $\varnothing < 3,7$ mm	21,58	<1
9	A3	Poros $\varnothing < 0,8$ mm Poros $\varnothing < 0,6$ mm	37,4	<1
10	A3	Rugosidad excesiva	120,27 mm	NA
11	B1	Zonas de traslape debido a un mal enfriamiento	132,65	NA

12	B1	Zonas de traslape debido a un mal enfriamiento	92,67	NA
13	B1	Zonas de traslape debido a un mal enfriamiento	87,62	NA
14	B2	Poros $\varnothing < 1,1$ mm Poros $\varnothing < 1,4$ mm Poros $\varnothing < 1,2$ mm	47,69	NA
15	B2	Zonas de traslape debido a un mal enfriamiento	62,37	NA
16	B2	Zonas de traslape debido a un mal enfriamiento	84,39	NA
17	B3	Zonas de traslape debido a un mal enfriamiento	89,47	NA
18	B3	Zonas de traslape debido a un mal enfriamiento	92,17	NA
19	C1	Porosidades	163,79	<1
20	C2	Poros $\varnothing < 1,2$ mm	1,2	<1
21	C2	Porosidades	142	<1
22	C3	Porosidades	125,79	<1

- Tubería P5

En las figuras 3.9, 3.10 y 3.11 se muestran los defectos encontrados en la tubería P5 los cuales son tabulados en la tabla 3.3.



Figura 3.9. Inspección visual de la sección A de la tubería P5.

Fuente: Propia

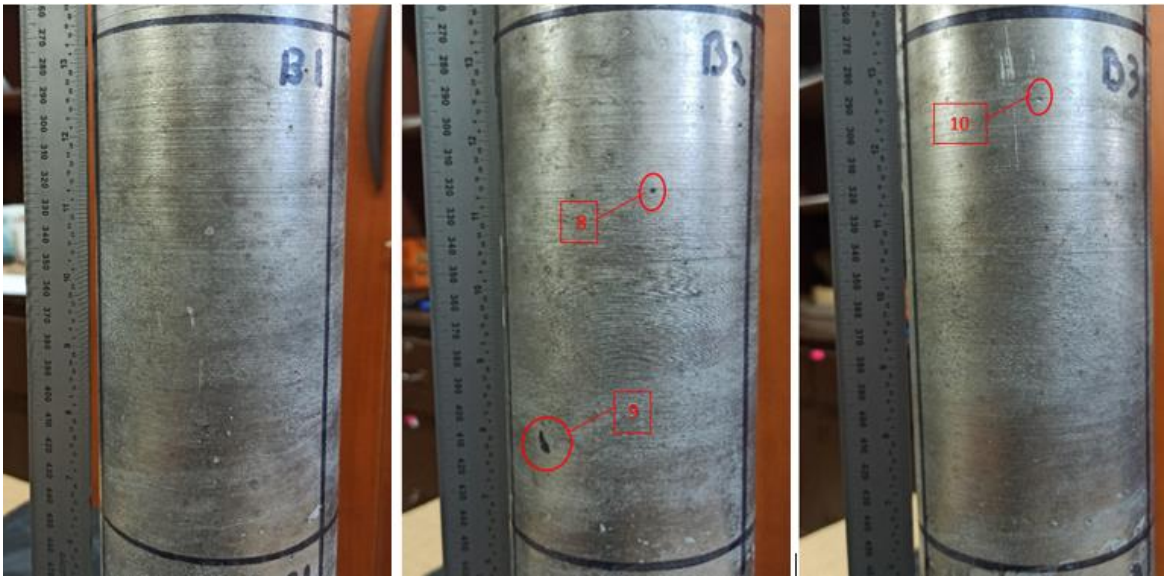


Figura 3.10. Inspección visual de la sección B de la tubería P5.

Fuente: Propia

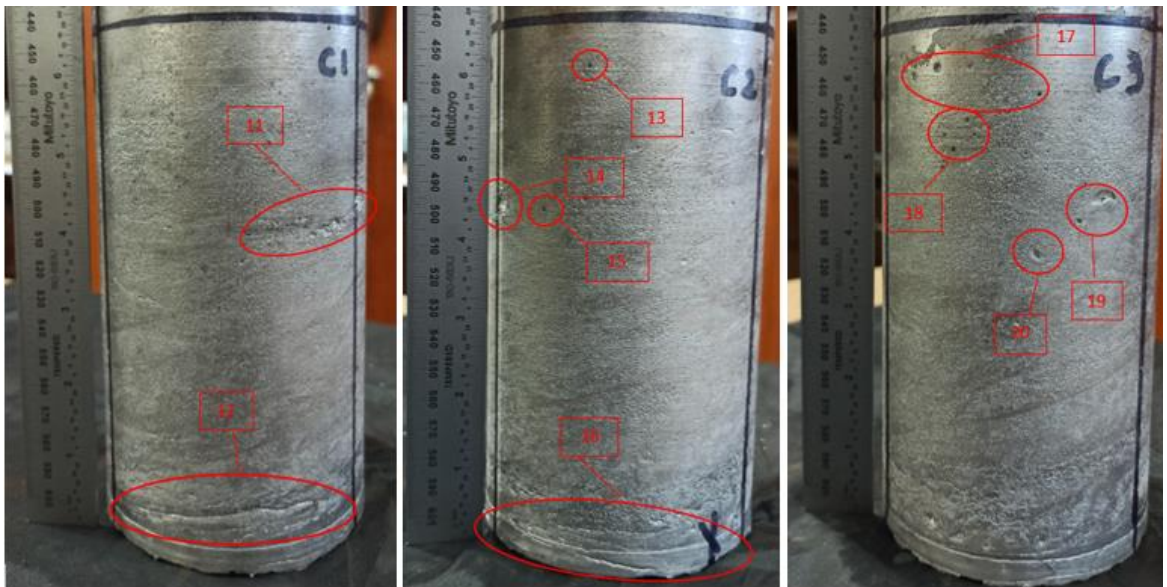


Figura 3.11. Inspección visual de la sección C de la tubería P5.

Fuente: Propia

Tabla 3.3. Defectos en la tubería P5.

Identificación de Discontinuidades				
Nº De Discontinuidad	ZONA	Tipo De Discontinuidad	Dimensión (mm)	Profundidad (mm)
1	A1	Zonas de traslape debido a un mal enfriamiento	86,38	NA
2	A1	Zonas de traslape debido a un mal enfriamiento	47,41	NA
3	A2	Zonas de traslape debido a un mal enfriamiento	26,29	NA
4	A2	Zonas de traslape debido a un mal enfriamiento	34,71	NA
5	A2	Zona con rugosidad excesiva	173,42	<1
6	A3	Zonas de traslape debido a un mal enfriamiento	73,12	<1
7	A3	Poros $\varnothing < 2,6$ mm	2,6	<1
8	B2	Poros $\varnothing < 3,1$ mm	21,58	<1
9	B2	Incrustación	12,2	<1
10	B3	Poros $\varnothing < 1,3$ mm	1,3 mm	NA
11	C1	Porosidades agrupadas	52,65	NA
12	C1	Zonas de traslape debido a un mal enfriamiento	67,32	NA
13	C2	Poros $\varnothing < 0,7$ mm	0,7	NA
14	C2	Poros $\varnothing < 6,3$ mm	6,3	NA
15	C2	Poros $\varnothing < 0,8$ mm	0,8	NA
16	C2	Zonas de traslape debido a un mal enfriamiento	69,32	NA
17	C3	Poros $\varnothing < 2,1$ mm Poros $\varnothing < 3,2$ mm Poros $\varnothing < 1,3$ mm Poros $\varnothing < 0,9$ mm	48,39	<1
18	C3	Poros $\varnothing < 1$ mm Poros $\varnothing < 1,1$ mm Poros $\varnothing < 0,9$ mm	28,24	<1
19	C3	Poros $\varnothing < 5,8$ mm Poros $\varnothing < 1,2$ mm	16,35	<1
20	C3	Poros $\varnothing < 3,3$ mm	3,2	<1

3.2.2. Resultados del ensayo de líquidos penetrantes (PT)

Al igual que en la inspección visual, para realizar el ensayo no destructivo de líquidos penetrantes se dividió a las tuberías en secciones para facilitar la localización y tabulación de los defectos existentes. Los reportes de los ensayos de líquidos penetrantes se encuentran en el ANEXO 3.

- Tubería P1

A continuación en las figuras 3.12 y 3.13 se muestran los defectos encontrados en la tubería P1 por medio del ensayo de líquidos penetrantes y en la tabla 3.4 se encuentran tabulados.

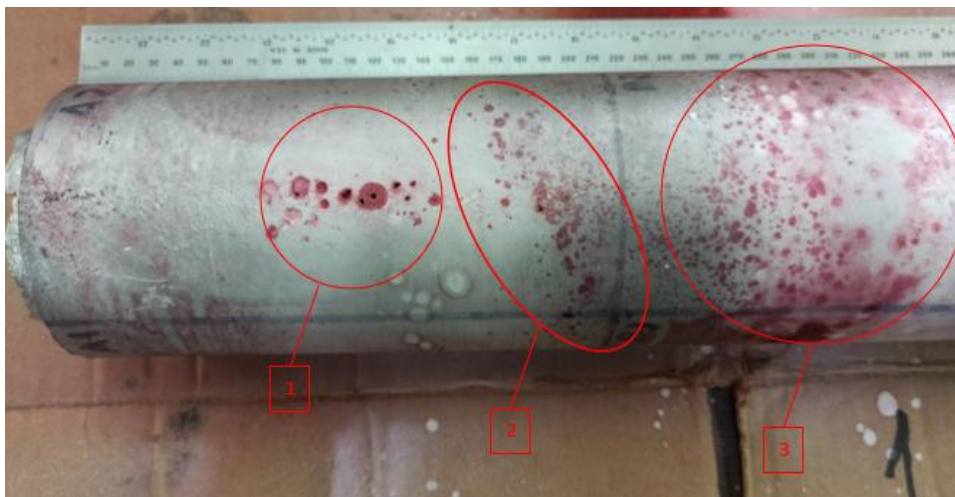


Figura 3.12. Ensayo de líquidos penetrantes en la tubería P1.

Fuente: Propia

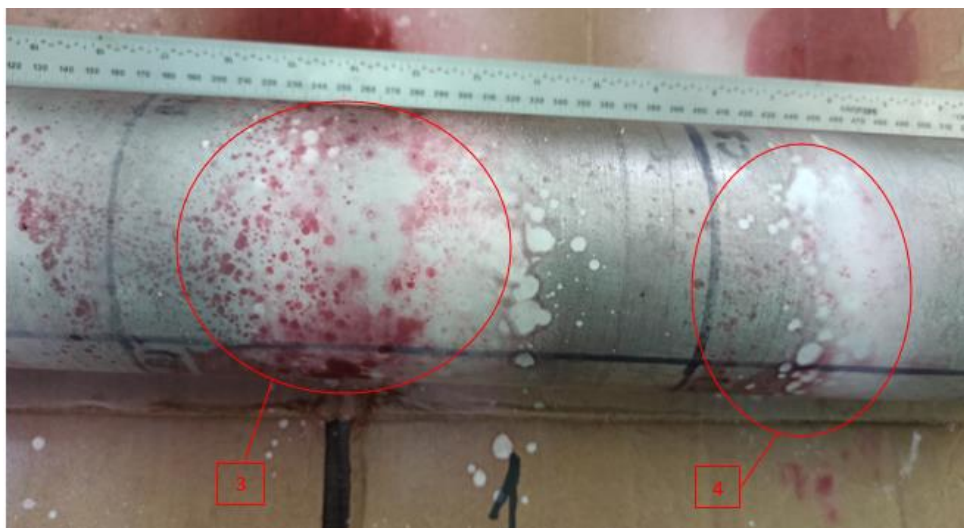


Figura 3.13. Ensayo de líquidos penetrantes en la tubería P1.

Fuente: Propia

Tabla 3.4. Defectos en la tubería P1.

Identificación de Discontinuidades				
N° De Discontinuidad	Zona	Tipo De Discontinuidad	Dimensión (mm)	Profundidad (mm)
1	A2	Nido de poros	65,24	Max 2,2 mm
2	A2	Rugosidad excesiva	122,41	NA
3	B2	Rugosidad excesiva y nidos de poros	124,08	NA
4	A2	Rugosidad excesiva	123,78	NA

- Tubería P3

A continuación en las figuras 3.14, 3.15 y 3.16 se muestran los defectos encontrados en la tubería P3 por medio del ensayo de líquidos penetrantes y en la tabla 3.5 se encuentran tabulados.

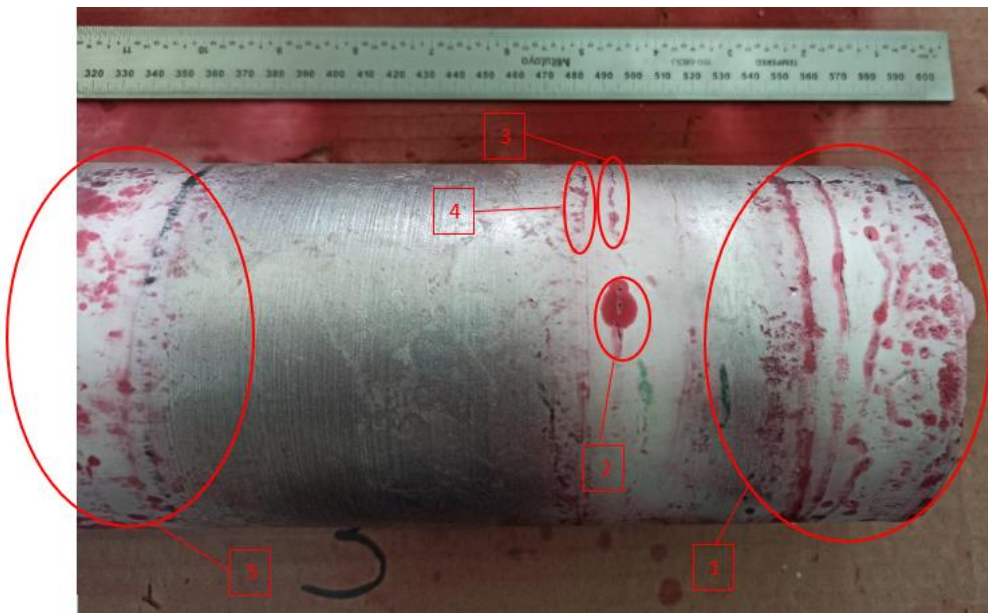


Figura 3.14. Ensayo de líquidos penetrantes en la tubería P3.

Fuente: Propia

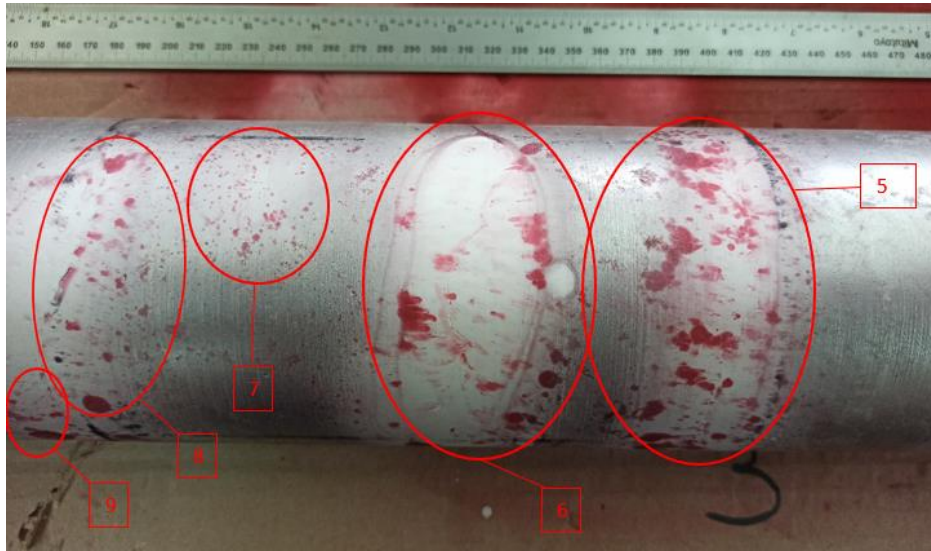


Figura 3.15. Ensayo de líquidos penetrantes en la tubería P3.

Fuente: Propia

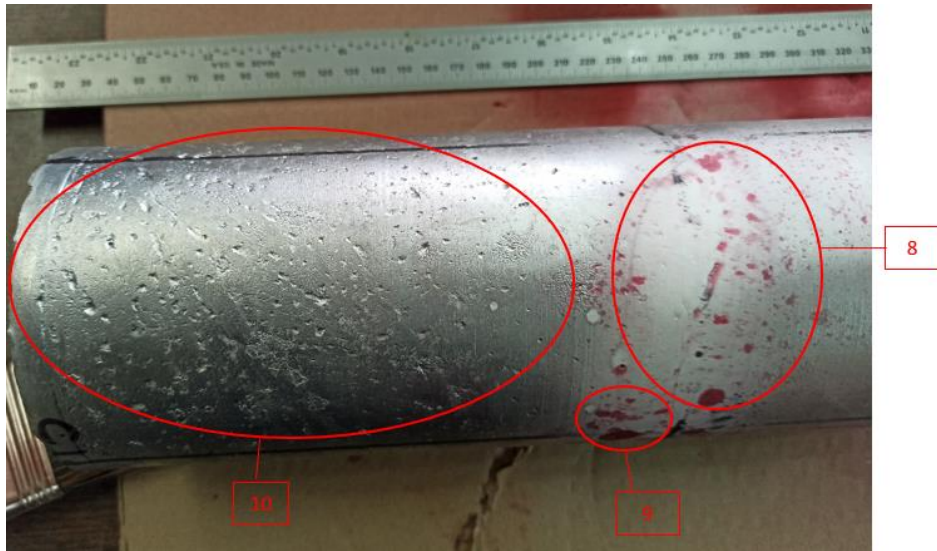


Figura 3.16. Ensayo de líquidos penetrantes en la tubería P3.

Fuente: Propia

Tabla 3.5. Defectos en la tubería P3.

Identificación de Discontinuidades				
N° De Discontinuidad	ZONA	Tipo De Discontinuidad	Dimensión (mm)	Profundidad (mm)
1	A1	Zonas de traslape debido a un mal enfriamiento	56,72	NA
2	A1	Poros	29,24	NA
3	A2	Fisuras	28,85	NA

4	A2	Fisuras	28,76	NA
5	A3	Nidos de poros y rugosidad excesiva	112,74	NA
6	A3	Nidos de poros y rugosidad excesiva	108,32	<1
7	A3	Nidos de poros y rugosidad excesiva	35,29	<1
8	A3	Nidos de poros y rugosidad excesiva	121,58	<1
9	A3	Nidos de poros y rugosidad excesiva	37,48	<1
10	A3	Rugosidad excesiva	120,27 mm	NA

- Tubería P5

A continuación en las figuras 3.17 y 3.18 se muestran los defectos encontrados en la tubería P3 por medio del ensayo de líquidos penetrantes y en la tabla 3.6 se encuentran tabulados.

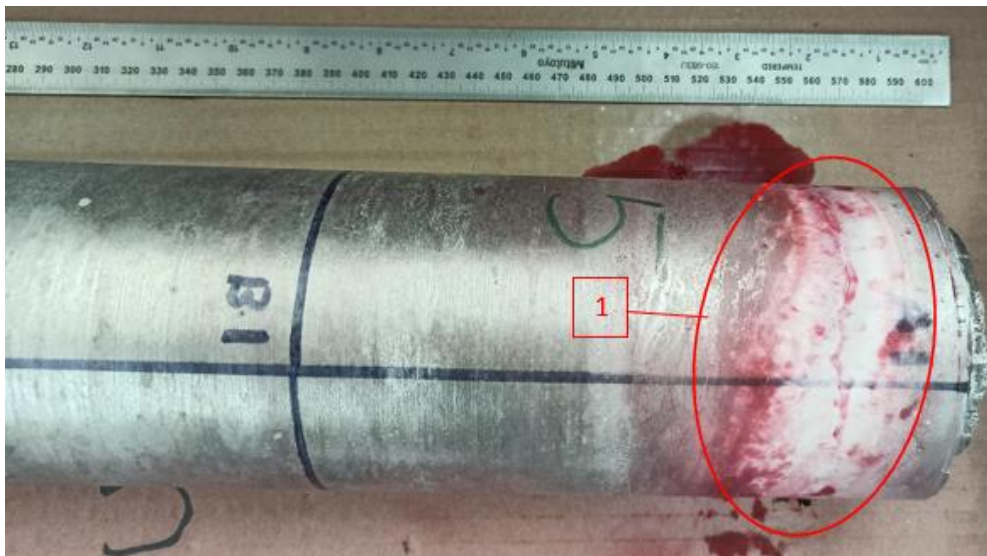


Figura 3.17. Ensayo de líquidos penetrantes en la tubería P5.

Fuente: Propia

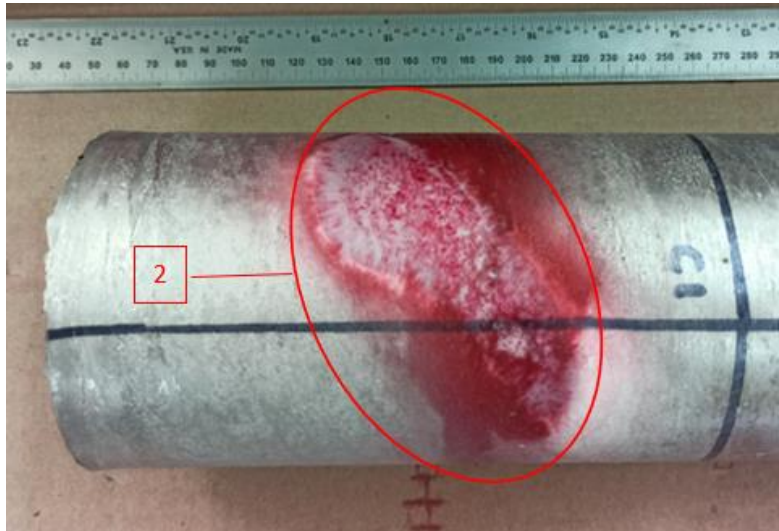


Figura 3.18. Ensayo de líquidos penetrantes en la tubería P5.

Fuente: Propia

Tabla 3.6. Defectos en la tubería P5.

Identificación de Discontinuidades				
N° De Discontinuidad	ZONA	Tipo De Discontinuidad	Dimensión (mm)	Profundidad (mm)
1	A2	Zonas de traslape debido a un mal enfriamiento	153.24	NA
2	A1	Rugosidad Excesiva	137,41	NA

3.3. Análisis de resultados

En las fundiciones de prueba realizadas en la máquina de colado centrifugo se pudo constatar que el rediseño de los componentes mecánicos fue muy satisfactorio ya que durante el funcionamiento de esta no se presentaron ninguno de los problemas por los que se necesitó un rediseño.

El ruido excesivo desapareció por completo debido a que se cambió completamente el sistema de transmisión de movimiento motor – molde que en el sistema anterior era el causante de esto, al sustituir el sistema de engranes por el sistema de rodets se eliminó este problema por completo además del problema de la excesiva vibración que era causado por la misma razón.

Otro problema solucionado fue el correspondiente al de las fugas de aceite, estas fugas provenían de los rodamientos utilizados como soportes del molde ya que estos estaban fabricados para trabajar en tractores, además de que no estaban sellados

herméticamente y al momento de poner en marcha la máquina de colado centrífugo y alcanzar temperaturas superiores a los 400°C se producían las fugas de lubricante y la quema de este, provocando esto la formación de gases nocivos para la salud. Este problema se solucionó al reemplazar el apoyo del molde en lugar de apoyarse en rodamientos este se apoya ahora en los mismos rodets que le transmiten el movimiento del motor.

3.3.1. Análisis del ensayo de inspección visual (VT)

El ensayo no destructivo de inspección visual se lo realizó a tres tuberías de aluminio de un total de cinco obtenidas en fundiciones de prueba denominadas P1, P3 y P5.

En el ensayo de inspección visual se pudo constatar que las dimensiones promedio de las tuberías son de 105 mm de longitud, un peso de 5 kg, un espesor en el lado A correspondiente al lado de ingreso de la colada de 15 mm y un espesor en el lado C de 16 mm. Todas obtenidas mediante el proceso de colado centrífugo de una fundición de aluminio.

El estado superficial de las tuberías en el lado externo es aceptable, presentando zonas lisas, así como también zonas con rugosidad y porosidad. Y en su superficie interior una rugosidad excesiva esto producto del proceso de obtención de las tuberías que al ser un proceso centrifugo por densidad se desplazan las impurezas de la fundición hacia el interior de la tubería.

En la tubería P1 como se indica en su reporte presenta en su superficie exterior discontinuidades tales como: contracción de material, siendo esta una discontinuidad muy común de encontrar en los extremos de tuberías formadas por centrifugado. Estas se forman debido a que en los extremos del molde es en donde se tiene la mayor variación de temperatura durante el proceso de colado o en su defecto son las zonas en donde se produce un enfriamiento más rápido que en la sección intermedia del molde, causando esta una contracción del material en los extremos. Además se tiene la presencia de una zona de traslape debido a un mal enfriamiento de la tubería en la zona central con una extensión de 90 mm, siendo todas estas discontinuidades causadas por una falta de control en la temperatura de enfriamiento durante el proceso de colado.

Adicional a esto se presentan agrupaciones de poros pero todas ellas con un diámetro menor a 1 mm. Cabe recalcar que la profundidad de cada una de las discontinuidades son menores a 1 mm.

Por otra parte la tubería P3 presenta en casi toda su extensión zonas de poros, las cuales van desde un diámetro de 1,1 mm hasta un máximo de 3,7 mm. Además existen

9 zonas de traslapes debido a un mal enfriamiento y también zonas en donde se presenta una rugosidad excesiva, siendo esta tubería la que más discontinuidades presenta.

En el caso de la tubería P5 se presentan 7 zonas en las que se tienen traslapes debido a un mal enfriamiento, numerosas zonas de poros que van desde un diámetro de 1 mm hasta un máximo de 5,8 mm. Además presenta una pequeña incrustación de 12,2 mm de dimensión esto debido a una posible falta de limpieza en el interior del molde antes del colado.

Una vez presentados los resultados del ensayo no destructivo de inspección visual se concluye que las tuberías P1 y P5 reúnen las características y los criterios aceptables para ser aprobadas. Esto debido a que las discontinuidades que presentan ambas tuberías son propias del proceso de colado centrífugo por el cual fueron obtenidas. Como observaciones importantes se tiene que se debe controlar de una manera más eficaz las temperaturas de precalentamiento, la temperatura y la velocidad de colado así como el posterior enfriamiento de la tubería, esto disminuiría con las zonas de traslapes observadas en estos dos tubos.

Por otro lado no se puede aprobar la tubería P3, debido a que esta tubería presenta un exceso de zonas con poros las cuales pudieron haber sido causadas por falta de degasificante, además de zonas de rugosidad excesiva las cuales son causadas por una limpieza deficiente en el interior del molde antes de empezar con el proceso de colado, así como también numerosas zonas de traslapes que son notables a simple vista lo que indica que no se tuvo un control adecuado con la velocidad de colado, la cual debe ser rápida y uniforme.

3.3.2. Análisis del ensayo de líquidos penetrantes

El ensayo no destructivo de líquidos penetrantes nos reveló en la tubería P1 la presencia de 2 zonas en las que existe un nido de poros, cuya profundidad máxima es de 2,2 mm y 3 zonas con una rugosidad excesiva a lo largo de toda la tubería.

En la tubería P3 se presentaron 6 zonas de poros y rugosidad excesiva, las cuales tienen una extensión de hasta 11 cm, además de ello 1 zona de traslape debido a un mal enfriamiento y 2 fisuras de 2,8 cm cada una.

Y por último la tubería P5 presenta 1 zona de traslape debido a un mal enfriamiento y 1 zona en donde existe una excesiva rugosidad superficial.

Dados estos resultados se puede concluir que el ensayo de líquidos penetrantes aplicado como apoyo al ensayo de inspección visual realizada previamente nos muestra las discontinuidades más representativas en las tuberías ensayadas, por esta razón se rechaza la tubería P3 ya que presencia notables fisuras, las mismas que son las menos deseadas en cuanto a elementos mecánicos se refiere, numerosas zonas de poros y de rugosidad superficial excesiva, aceptando de esta manera las tuberías P1 y P5.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- El rediseño de la máquina de colado centrífugo horizontal fue muy satisfactorio, ya que gracias a los nuevos subsistemas y elementos mecánicos se pudieron eliminar todos los problemas que presentaba la máquina, entre ellos está el derramamiento y la quema innecesaria de lubricante que provenía de las chumaceras antiguas utilizadas como subsistema de apoyo y de transmisión de movimiento, el mismo que generaba vapores nocivos para la salud de los operarios.
- El ruido y la vibración excesiva proveniente de los engranajes y los rodamientos del antiguo sistema de transmisión fue eliminado por completo gracias a la implementación de un sistema de transmisión conformado por rodets, los cuales transmiten la potencia del motor al molde utilizando la fricción.
- La implementación del sistema de transmisión por medio de rodets de fricción permite que el molde tenga una rotación uniforme, disminuyendo a esta forma las discontinuidades que eran producidas por efectos de la vibración producida por la falta de balance en el molde.
- El apoyo del molde en los rodets permite que al momento de realizar el precalentamiento la temperatura se distribuya uniformemente a lo largo de todo el molde y evitar que el calor se concentre en el medio como ocurría con las chumaceras del antiguo subsistema de apoyo.

- La implementación del rodete superior permite la operación de la máquina de colado centrífugo horizontal con una mayor seguridad, ya que este evita que el molde se desplace en direcciones no deseadas, manteniéndolo en su posición.
- Tras la realización de los ensayos no destructivos de inspección visual y su posterior apoyo con el ensayo de líquidos penetrantes se determina que las tuberías P1 y P5 son aceptadas, ya que se considera que las discontinuidades encontradas en ambas tuberías son propias del proceso de colado centrífugo por el cual se obtuvieron los tubos de aluminio y la mayoría de ellas pueden ser mitigadas con una correcta limpieza de la superficie interna del molde.
- La tubería P3 es rechazada, ya que tras la realización del ensayo no destructivo de inspección visual con su posterior apoyo en el ensayo no destructivo de líquidos penetrantes muestra la presencia de 2 fisuras, las cuales al ser muy profundas no están dentro de las características deseadas para los tubos de aluminio.

4.2. Recomendaciones

- Para evitar el desgaste por contacto de los rodetes de transmisión se debe verificar que el molde se encuentre centrado, la máquina correctamente nivelada y que los rodetes estén dentro de sus respectivas pistas, esto evitará que existan contactos innecesarios que pueden producir desgaste.
- Los traslapes formados en las tuberías de aluminio obtenidas por la máquina de colado centrífugo horizontal pueden solucionarse aplicando una velocidad de colado del aluminio uniforme y rápida.
- Se recomienda realizar un nuevo estudio paramétrico de la máquina de colado centrífugo horizontal, ya que con su rediseño es mucho más fácil la variación de parámetros y de esta manera se puede disminuir el número de discontinuidades presentes en las tuberías.

Bibliografía

- [1] L. Huilca and É. Almeida, "Obtención de Tubos Sin Costura por el Proceso de Colado por Centrifugado Horizontal," 2012.
- [2] M. Gómez and H. Jami, "Estudio Paramétrico del Proceso de Colado Centrifugo Horizontal Para la Obtención de Tubos de Aluminio Sin Costura," 2017.
- [3] M. P. Groover, *Fundamentos de Manufactura Moderna*, 3ra Edición. 2007.
- [4] Gerling, *Moldeo y Conformación*. 1979.
- [5] Kalpajian, Serope, and Schmid, *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*. 2002.
- [6] P. E. Tippens, *Física, conceptos y aplicaciones*, 7ma edición. 2011.
- [7] H. Bawa, *Procesos de Manufactura*. McGraw-Hill, 2007.
- [8] J. Villacís, "Elaboración de Barras de Aleaciones Especiales por Centrifugación bajo Norma ASTM," 2009.
- [9] C. Riba, *Diseño Concurrente*, 1ra Edición. Catalunya, 2002.
- [10] R. G. Budynas and J. Keith Nisbett, *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*, 9na Edición. 2012.
- [11] "Catálogo de Rodamientos FAG Rodamientos de bolas · Rodamientos de rodillos · Soportes · Accesorios."
- [12] SKF, "Catálogo de Rodamientos SKF," 2015.
- [13] A. Garrido and Sánchez Victor, "Determinación de la Metodología para la Obtención de Aleaciones de Aluminio de Fundición Maquinables sin Porosidades," 2011.

ANEXO I
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL MOTOR ELÉCTRICO



Nr.:

Fecha: 26-SEP-2019

Cliente :

TECHNICAL PROPOSAL

Motor trifásico de inducción - Rotor de jaula

Línea del producto : W22 Carcasa de Hierro Gris - Standard Efficiency - IE1

Catalog Number :

List Price : \$

Observaciones:

Ejecutante:

Verificado:



Nr.:

Fecha: 26-SEP-2019

HOJA DE DATOS

Motor trifásico de inducción - Rotor de jaula

Cliente :
Línea del producto : W22 Carcasa de Hierro Gris - Standard Efficiency - IE1

Carcasa : 100L
Potencia : 5 HP
Frecuencia : 60 Hz
Polos : 4
Rotación nominal : 1710 rpm
Deslizamiento : 5,00 %
Voltaje nominal : 220/440 V
Corriente nominal : 14,0/7,01 A
Corriente de arranque : 89,7/44,9 A
I_p/I_n : 6,4
Corriente en vacío : 6,47/3,24 A
Par nominal : 20,7 Nm
Par de arranque : 270 %
Par máxima : 290 %
Categoría : ---
Clase de aislación : F
Elevación de temperatura : 80 K
Tiempo de rotor bloqueado : 11 s (caliente)
Factor de servicio : 1,15
Régimen de servicio : S1
Temperatura ambiente : -20°C - +40°C
Altitud : 1000 m
Protección : IPW55
Masa aproximada : 33 kg
Momento de inercia : 0,00968 kgm²
Nivel de ruido : 54 dB(A)

	Delantero	Trasero	Carga	Factor de potencia	Rendimiento (%)
Rodamiento	6206 ZZ	6205 ZZ	100%	0,81	85,5
Intervalo de lubricación	---	---	75%	0,75	85,5
Cantidad de grasa	---	---	50%	0,63	85,0

Observaciones:

Rendimiento de acuerdo con el método indirecto de IEC 60034-1:2007 con pérdidas aleatorias de la carga determinadas de las medidas.

Ejecutante

Verificado

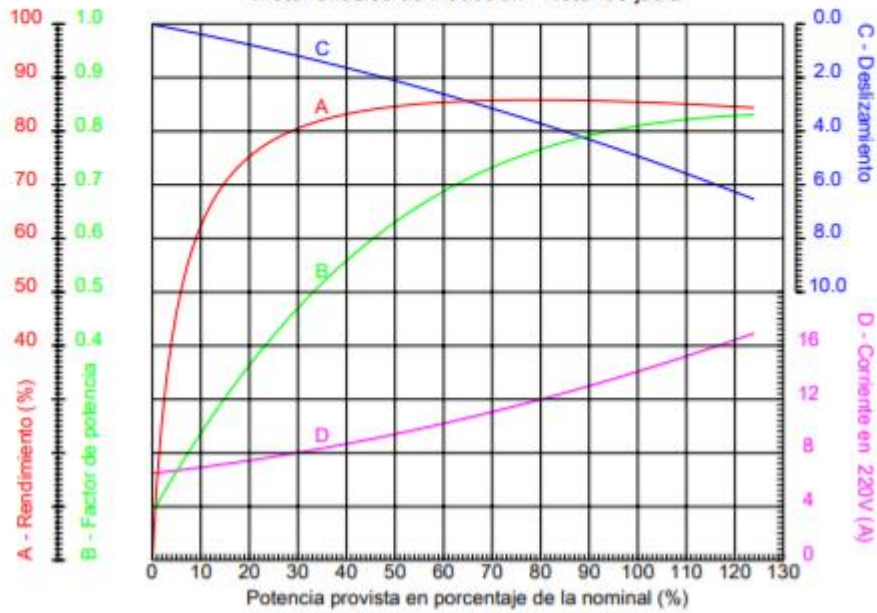


Nr.:

Fecha: 26-SEP-2019

CURVAS CARACTERÍSTICAS EN FUNCIÓN DE LA POTENCIA

Motor trifásico de inducción - Rotor de jaula



Cliente	:	
Línea del producto	:	W22 Carcasa de Hierro Gris - Standard Efficiency - IE1

Carcasa	: 100L	Ip/In	: 6,4
Potencia	: 5 HP	Régimen de servicio	: S1
Frecuencia	: 60 Hz	Factor de servicio	: 1,15
Rotación nominal	: 1710 rpm	Categoría	: —
Voltaje nominal	: 220/440 V	Par de arranque	: 270 %
Corriente nominal	: 14,0/7,01 A	Par máxima	: 290 %
Clase de aislación	: F		

Observaciones:

Ejecutante	Verificado
------------	------------

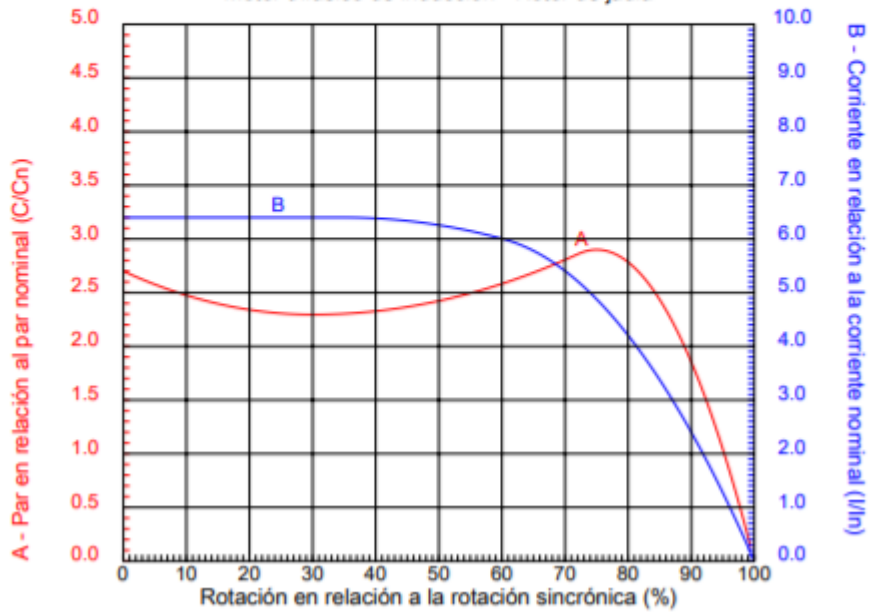


Nr.:

Fecha: 26-SEP-2019

CURVAS CARACTERÍSTICAS EN FUNCIÓN DE LA ROTACIÓN

Motor trifásico de inducción - Rotor de jaula

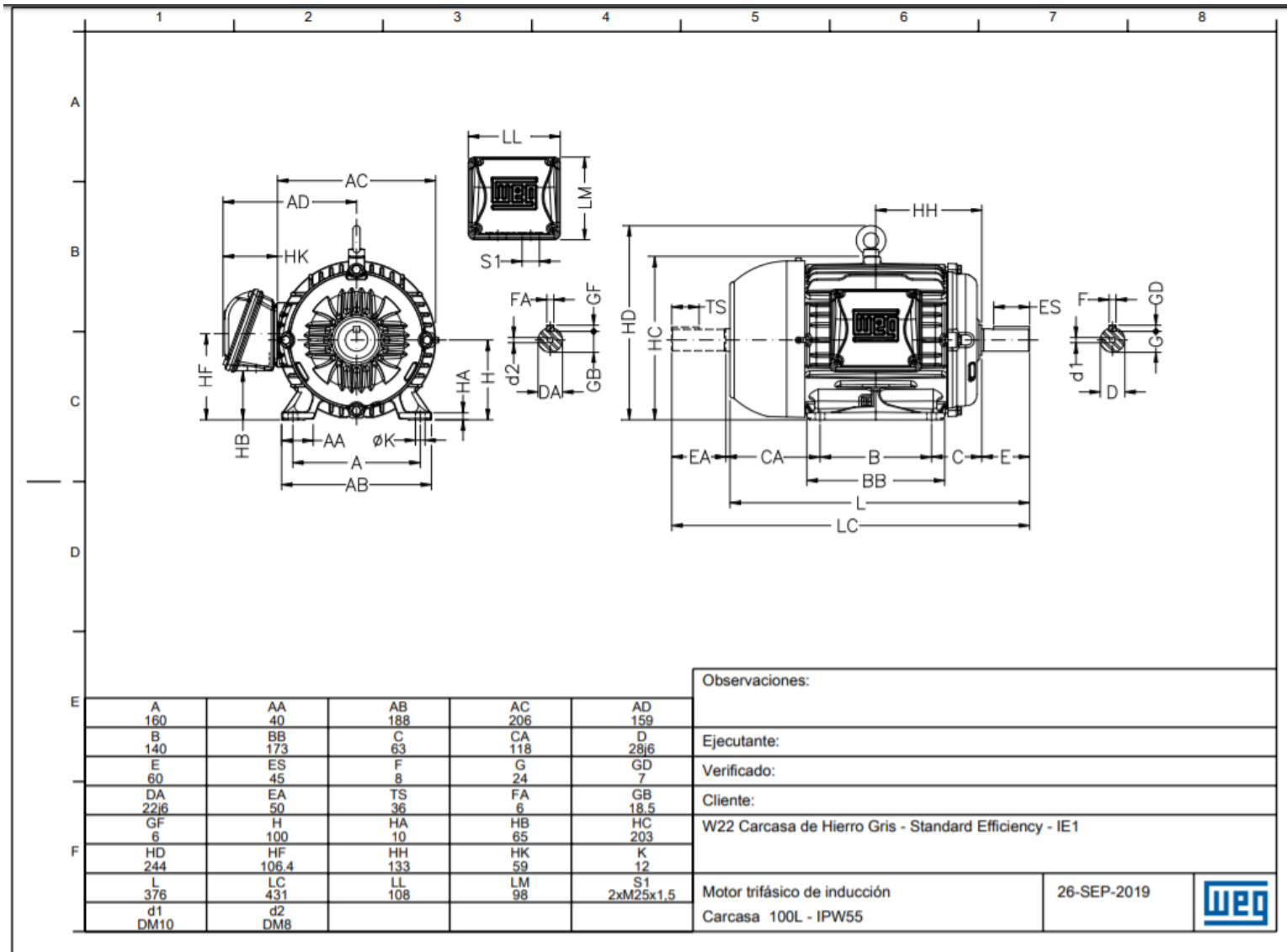


Cliente	:	
Línea de producto	:	W22 Carcasa de Hierro Gris - Standard Efficiency - IE1

Carcasa	: 100L	Ip/In	: 6,4
Potencia	: 5 HP	Régimen de servicio	: S1
Frecuencia	: 60 Hz	Factor de servicio	: 1,15
Rotación nominal	: 1710 rpm	Categoría	: ---
Voltaje nominal	: 220/440 V	Par de arranque	: 270 %
Corriente nominal	: 14,0/7,01 A	Par máxima	: 290 %
Clase de aislación	: F		

Observaciones:

Ejecutante	Verificado
------------	------------



Observaciones:

Ejecutante:


Verificado:

Cliente:

W22 Carcasa de Hierro Gris - Standard Efficiency - IE1

Motor trifásico de inducción
Carcasa 100L - IPW55

26-SEP-2019



ANEXO II
REPORTE DE ENSAYO DE INSPECCIÓN VISUAL



REPORTE DE INSPECCIÓN POR INSPECCIÓN VISUAL

DATOS GENERALES	
Cientes: Jean Paúl Andrade, Estudiante	Reporte N°: LEND-EPN-2020-R-07-VT-03
Fecha de inspección: 11/08/2020	Lugar: Quito-Ecuador
Orden de trabajo: 2020-R-07	Quipux/Documento de referencia: EPN-DMT-2020-1417-M
IDENTIFICACIÓN DE LA PIEZA	
Descripción: Tubería 1 Diámetro: 105 mm Espesor Lado A: 16,87 mm Espesor Lado C: 18,29 mm Longitud: 524 mm Peso: 5,015 kg Proceso de obtención: Fundición Tubería 3 Diámetro: 105 mm Espesor Lado A: 13,95 mm Espesor Lado C: 25,65 mm Longitud: 519 mm Peso: 4,820 kg Proceso de obtención: Fundición Tubería 5 Diámetro: 105 mm Espesor Lado A: 16,52 mm Espesor Lado C: 15,73 mm Longitud: 515 mm Peso: 4,410 kg Proceso de obtención: Fundición	Identificación: 2020-R-07-VT-03-P1 2020-R-07-VT-03-P3 2020-R-07-VT-03-P5
Material: Aluminio Fundido	Estado Superficial: Las tuberías presentan internamente rugosidad excesiva, y externamente presentan zonas lisas y otras zonas con rugosidad y porosidad excesiva.

ESQUEMA DE LA PIEZA
2020-R-07-VT-03-P1



2020-R-07-VT-03-P3



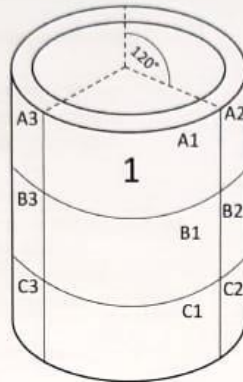
2020-R-07-VT-03-P5



EQUIPOS Y MATERIALES		
Equipos		
Luxómetro	Marca	Insize
	Modelo	SL-B
	Rango	(0 a 200)
	Resolución	0.01
	Certificado de calibración N°	LL-2020-0014
Galga de Soldadura	Marca	Bridge Cam
	Modelo	CAM TYPE GAUGE
	Rango	(0 a 25.4) (0 a 1)
	Resolución	1
	Certificado de calibración N°	Por calibrar
Luxómetro o Radiómetro	Marca	SPRECTROLINE
	Modelo	DSE-100X
	Rango	uw/cm ² y fc
	Resolución	0,001
	Certificado de calibración N°	Por Calibrar
Lupa 20 X	Marca	HANG MAG SKYZONAL
	Modelo	GNYFING GLASS DS-3
	División escala	No aplica
	Certificado de calibración N°	Por calibrar
Regla Metálica	Marca	Mitutoyo
	Modelo	180603 U
	Rango	0 a 400
	División escala	0.5
	Certificado de calibración N°	Por calibrar
Materiales e Insumos		
Limpiador / removedor	Marca	Met-L-check
	Tipo	E-59A 1 & 2
	Método	C
	Clase	2
Guaipes	Marca	No Aplica
CONDICIONES DE TRABAJO		
Procedimiento:		
1) Se toma fotografías iniciales del estado superficial y estructural de las 3 tuberías, es importante tomar estas fotografías con una referencia en este caso una regla calibrada a lado de cada una de las tuberías, con el fin de tener una referencia dimensional.		
2) Se toma los datos de las condiciones ambientales iniciales, temperatura de 22 °C.		
3) Para proseguir con la medición de intensidad de luz en el área en la que se va a realizar el ensayo, 2500 lux (Medición obtenida con el radiómetro del laboratorio)		
4) Se procede a realizar la limpieza de la superficie a inspeccionar, utilizando el líquido E-59A Cleaner & Remover, la limpieza esta de acorde al procedimiento de inspección previamente revisado y aprobado en el laboratorio. Se toma fotografías una vez terminada la limpieza.		

- 5) Se procede a señalar en las probetas las zonas de estudio (Esquema de zonificación), primero se divide a las tuberías en 3 partes iguales separadas 120° entre sí, para luego proceder a dividir esas tres zonas en tres partes A de 170 mm, B de 170 mm y C de 180 mm aproximadamente.
- 6) Para realizar la inspección, se comenzó por la parte dimensional, la rectitud, la concavidad y la convexidad, para luego proceder con la búsqueda de discontinuidades y con un rotulador (marcador metálico) señalar su ubicación. Se tomó fotografías una vez terminada la búsqueda y el señalamiento de las discontinuidades.
- 7) Con ayuda de instrumentos de medición (galgas, reglas calibradas, calibradores) se tomó las dimensiones de todas las discontinuidades para el registro documental.

Esquema de zonificación



RESULTADOS

Zonificación

2020-R-07-VT-03-P1



Identificación de Discontinuidades				
N° De Discontinuidad	Zona	Tipo De Discontinuidad	Dimensión (mm)	Profundidad (mm)
1	A1	Contracción de material	5,02	1
2	A1	Contracción de material	4,72	1
3	A1	Agrupación de poros $\varnothing < 1$ mm	55,36	NA
4	A2	Rugosidad extrema y descascaramiento de material	178,62	NA
5	A3	Rugosidad excesiva	112,31	NA
6	A3	Contracciones del material	3,02	<1
			2,71	<1
			1,67	<1
7	B1	Rugosidad excesiva	110,24	<1
8	B1	Rugosidad excesiva	88,63	<1
9	B2	Rugosidad excesiva	164,36	<1
10	B2	Poros	<1	<1
11	B3	Agrupación de poros $\varnothing < 1$ mm	73,82	<1
12	B3	Zonas de traslape debido a un mal enfriamiento	90 mm	NA
13	B3	Agrupación de poros $\varnothing < 1$ mm	86,43	<1
14	C1	Agrupación de poros $\varnothing < 1$ mm	62,48	<1
15	C1	Contracciones	\varnothing 1,02	<1
			\varnothing 2,61	<1
			\varnothing 3,57	<1
16	C2	Agrupación de poros $\varnothing < 1$ mm	76,24	<1
17	C3	Agrupación de poros $\varnothing < 1$ mm	62,37	<1
18	C3	Agrupación de poros $\varnothing < 1$ mm	1	<1
19	C3	Agrupación de poros $\varnothing < 1$ mm	1	<1
20	C3	Fisura	7	NA
Zonificación	2020-R-07-VT-03-P3			



Identificación de Discontinuidades				
N° De Discontinuidad	ZONA	Tipo De Discontinuidad	Dimensión (mm)	Profundidad (mm)
1	A1	Zonas de traslape debido a un mal enfriamiento	56,72	NA
2	A1	Zonas de traslape debido a un mal enfriamiento	64,71	NA
3	A2	Poros $\varnothing < 3,5$ mm Poros $\varnothing < 2,8$ mm	26,29	NA
4	A2	Poros $\varnothing < 1,4$ mm Poros $\varnothing < 2,6$ mm Poros $\varnothing < 1,7$ mm	34,71	NA
5	A3	Poros $\varnothing < 1,1$ mm Poros $\varnothing < 1,4$ mm Poros $\varnothing < 1,2$ mm	17,41	<1
6	A3	Poros $\varnothing < 1,1$ mm	1,1	<1
7	A3	Rugosidad excesiva	82,36	<1
8	A3	Poros $\varnothing < 3,1$ mm Poros $\varnothing < 3,7$ mm	21,58	<1
9	A3	Poros $\varnothing < 0,8$ mm Poros $\varnothing < 0,6$ mm	37,4	<1
10	A3	Rugosidad excesiva	120,27 mm	NA
11	B1	Zonas de traslape debido a un mal enfriamiento	132,65	NA
12	B1	Zonas de traslape debido a un mal enfriamiento	92,67	NA
13	B1	Zonas de traslape debido a un mal enfriamiento	87,62	NA
14	B2	Poros $\varnothing < 1,1$ mm Poros $\varnothing < 1,4$ mm Poros $\varnothing < 1,2$ mm	47,69	NA
15	B2	Zonas de traslape debido a un mal enfriamiento	62,37	NA
16	B2	Zonas de traslape debido a un mal enfriamiento	84,39	NA
17	B3	Zonas de traslape debido a un mal enfriamiento	89,47	NA
18	B3	Zonas de traslape debido a un mal enfriamiento	92,17	NA
19	C1	Porosidades	163,79	<1

20	C2	Poros $\varnothing < 1,2$ mm	1,2	<1
21	C2	Porosidades	142	<1
22	C3	Porosidades	125,79	<1
Zonificación		2020-R-07-VT-03-P5		



Identificación de Discontinuidades

N° De Discontinuidad	ZONA	Tipo De Discontinuidad	Dimensión (mm)	Profundidad (mm)
1	A1	Zonas de traslape debido a un mal enfriamiento	86,38	NA
2	A1	Zonas de traslape debido a un mal enfriamiento	47,41	NA
3	A2	Zonas de traslape debido a un mal enfriamiento	26,29	NA
4	A2	Zonas de traslape debido a un mal enfriamiento	34,71	NA
5	A2	Zona con rugosidad excesiva	173,42	<1
6	A3	Zonas de traslape debido a un mal enfriamiento	73,12	<1
7	A3	Poros $\varnothing < 2,6$ mm	2,6	<1
8	B2	Poros $\varnothing < 3,1$ mm	21,58	<1

9	B2	Incrustación	12,2	<1
10	B3	Poros $\varnothing < 1,3$ mm	1,3 mm	NA
11	C1	Porosidades agrupadas	52,65	NA
12	C1	Zonas de traslape debido a un mal enfriamiento	67,32	NA
13	C2	Poros $\varnothing < 0,7$ mm	0,7	NA
14	C2	Poros $\varnothing < 6,3$ mm	6,3	NA
15	C2	Poros $\varnothing < 0,8$ mm	0,8	NA
16	C2	Zonas de traslape debido a un mal enfriamiento	69,32	NA
17	C3	Poros $\varnothing < 2,1$ mm Poros $\varnothing < 3,2$ mm Poros $\varnothing < 1,3$ mm Poros $\varnothing < 0,9$ mm	48,39	<1
18	C3	Poros $\varnothing < 1$ mm Poros $\varnothing < 1,1$ mm Poros $\varnothing < 0,9$ mm	28,24	<1
19	C3	Poros $\varnothing < 5,8$ mm Poros $\varnothing < 1,2$ mm	16,35	<1
20	C3	Poros $\varnothing < 3,3$ mm	3,2	<1

Nota:

Este informe tiene validez únicamente en su forma íntegra y original, no se permite la reproducción parcial o total de este documento, sin la autorización por escrita de LEND-EPN

OPERADOR: Ing. Santiago Camacho	
Nivel: INSPECCIÓN VISUAL –ASNT NIVEL II	
Laboratorio de Ensayos No Destructivos LAB-END	Cliente
Fecha: 31/08/2020	Fecha: 31/08/2020
Firma: Ing. Santiago Camacho ASISTENTE DE ENSAYOS LEND ASNT Nivel II en Inspección Visual	Firma: Nombre: NOMBRE APELLIDO Contacto: 0987654321 Correo: NOMBRE.APELLIDO@epn.edu.ec
Firma: Ing. Verónica Sotomayor JEFE LEND ASNT Nivel II en Inspección Visual	

----- FIN DE INFORME -----
----- END OF REPORT -----

ANEXO III
REPORTE DE ENSAYO DE LÍQUIDOS PENETRANTES



REPORTE DE INSPECCIÓN POR LÍQUIDOS PENETRANTES

DATOS GENERALES	
Clientes: Jean Paúl Andrade, Estudiante	Reporte N°: LEND-EPN-2020-R-08-LP-03
Fecha de inspección: 06/08/2020	Lugar: Quito-Ecuador
Orden de trabajo: 2020-R-08	Quipux/Documento de referencia: EPN-DMT-2020-1417-M
IDENTIFICACIÓN DE LA PIEZA	
Descripción: Tubería 1 Diámetro: 105 mm Espesor Lado A: 16,87 mm Espesor Lado C: 18,29 mm Longitud: 524 mm Peso: 5,015 kg Proceso de obtención: Fundición Tubería 3 Diámetro: 105 mm Espesor Lado A: 13,95 mm Espesor Lado C: 25,65 mm Longitud: 519 mm Peso: 4,820 kg Proceso de obtención: Fundición Tubería 5 Diámetro: 105 mm Espesor Lado A: 16,52 mm Espesor Lado C: 15,73 mm Longitud: 515 mm Peso: 4,410 kg Proceso de obtención: Fundición	Identificación: 2020-R-07-LP-03-P1 2020-R-07-LP-03-P3 2020-R-07-LP-03-P5
Material: Aluminio Fundido	Estado Superficial: Las tuberías presentan internamente rugosidad excesiva, y externamente presentan zonas lisas y otras zonas con rugosidad y porosidad excesiva.

ESQUEMA DE LA PIEZA
2020-R-07-VT-03-P1



2020-R-07-VT-03-P3



2020-R-07-VT-03-P5



EQUIPOS Y MATERIALES		
Equipos		
Luxómetro	Marca	Insize
	Modelo	SL-B
	Rango	(0 a 200)
	Resolución	0.01
	Certificado de calibración N°	LL-2020-0014
Galga de Soldadura	Marca	Bridge Cam
	Modelo	CAM TYPE GAUGE
	Rango	(0 a 25.4) (0 a 1)
	Resolución	1
	Certificado de calibración N°	Por calibrar
Luxómetro o Radiómetro	Marca	SPRECTROLINE
	Modelo	DSE-100X
	Rango	Uw/cm ² y fc
	Resolución	0,001
	Certificado de calibración N°	Por Calibrar
Lupa 20 X	Marca	HANG MAG SKYZONAL
	Modelo	GNYPING GLASS DS-3
	División escala	No aplica
	Certificado de calibración N°	Por calibrar
Regla Metálica	Marca	Mitutoyo
	Modelo	180603 U
	Rango	0 a 400
	División escala	0.5
	Certificado de calibración N°	Por calibrar
Penetrante	Marca	Met-L-check VP-31A
	Tipo	2
	Método	C
	Método de limpieza	Limpiador E59A

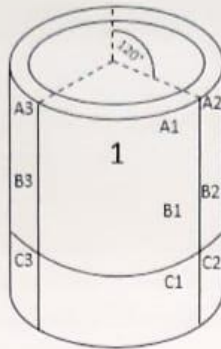
Revelador	Marca	Met-L-check
	Tipo	D70
	Método DE LIMPIEZA	A,B,C & D
	Forma	D & E
Limpiador / removedor	Marca	Met-L-check
	Tipo	E-59A 1 & 2
	Método	C
	Clase	2
Thinner	Marca	FERREKRET
	Tipo	Industrial
	Método	Disolvente
	Clase	Acrílico

CONDICIONES DE TRABAJO

Procedimiento:

- 1) Se tomó fotografías iniciales del estado superficial y estructural de las 3 tuberías, es importante tomar estas fotografías con una referencia en este caso una regla calibrada a lado de cada una de las tuberías, con el fin de tener una referencia dimensional.
- 2) Se tomó datos de las condiciones ambientales iniciales, temperatura de 22 °C.
- 3) Para proseguir con la medición de intensidad de luz en el área en la que se va a realizar el ensayo, 2800 lux (Medición obtenida con el radiómetro del laboratorio en el área de Líquidos Penetrantes)
- 4) Se realizó la limpieza de la superficie a inspeccionar, utilizando el líquido E-59A Cleaner & Remove, la limpieza esta de acorde al procedimiento de inspección previamente revisado y aprobado en el laboratorio. Se toma fotografías una vez terminada la limpieza.
- 5) Se procedió a señalar en las probetas las zonas de estudio (Esquema de zonificación), primero se divide a las tuberías en 3 partes iguales separadas 120° entre sí, para luego proceder a dividir esas tres zonas en tres partes A de 170 mm, B de 170 mmm y C de 180 mm aproximadamente.
- 6) Para realizar la inspección, se comenzó por la parte dimensional, la rectitud, la concavidad y la convexidad, para luego proceder con la búsqueda de discontinuidades y con un rotulador (marcador metálico) señalar su ubicación. Se tomó fotografías una vez terminada la búsqueda y el señalamiento de las discontinuidades.
- 7) Con ayuda de instrumentos de medición (galgas, reglas calibradas, calibradores) se tomó las dimensiones de todas las discontinuidades para el registro documental.
- 8) Para la aplicación de este método de ensayo no destructivo, se realizó una muy buena limpieza de la superficie a inspeccionar, se uso el líquido E-59A Cleaner & Remove, la limpieza esta de acorde al procedimiento de inspección aprobado en el laboratorio. Se tomó fotografías una vez terminada la limpieza.
- 9) Se aplicó el líquido penetrante y se esperó un tiempo de 12 minutos.
- 10) Se procedió a realizar la limpieza de exceso del penetrante, utilizando líquido E-59A Cleaner & Remove, la limpieza utilizó un paño humedecido de algodón con E-59A y se realizó pases suaves sobre la superficie en una sola dirección.
- 11) Al aplicar el revelador D-70 Nonaqueous Developer. Se roció una sola capa a una distancia de 15 cm y un ángulo de 45° con respecto a la horizontal.
- 12) Inmediatamente después de haber aplicar el revelador se observó como el penetrante sale hacia la superficie.
- 13) Tomar fotografías una vez terminada la numeración de las manchas, siempre con la regla junto a la probeta.
- 16) Con ayuda de instrumentos de medición (galgas, reglas calibradas, calibradores) se tomó las dimensiones de todas las discontinuidades para el registro documental.

Esquema de zonificación



RESULTADOS

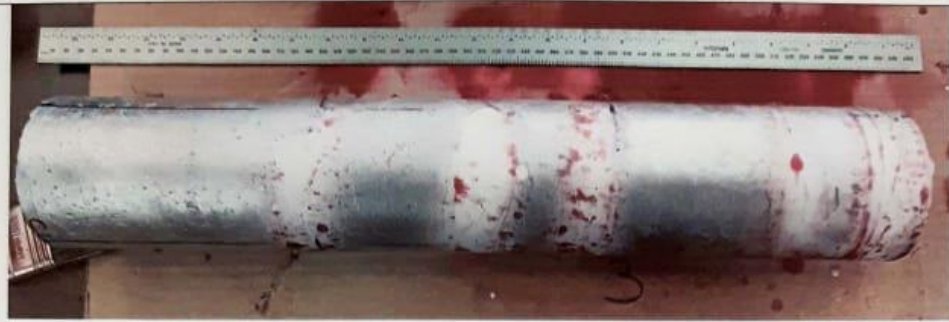
Zonificación 2020-R-07-VT-03-P1



Nota: Se presenta el anexo 1-Tubería 1 para la identificación de las discontinuidades (De izquierda a derecha)

Identificación de Discontinuidades

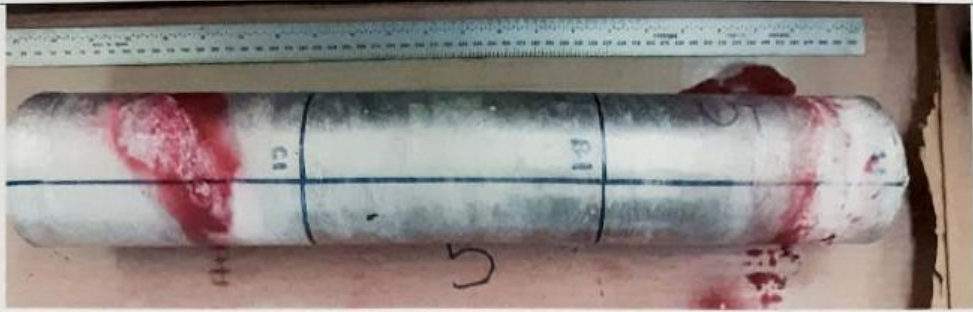
N° De Discontinuidad	Zona	Tipo De Discontinuidad	Dimensión (mm)	Profundidad (mm)
1	A2	Nido de poros	65,24	Max 2,2 mm
2	A2	Rugosidad excesiva	122,41	NA
3	B2	Rugosidad excesiva y nidos de poros	124,08	NA
4	A2	Rugosidad excesiva	123,78	NA
Zonificación	2020-R-07-VT-03-P3			



Nota: Se presenta el anexo 2-Tubería 3 para la identificación de las discontinuidades (De derecha a izquierda)

Identificación de Discontinuidades

N° De Discontinuidad	ZONA	Tipo De Discontinuidad	Dimensión (mm)	Profundidad (mm)
1	A1	Zonas de traslape debido a un mal enfriamiento	56,72	NA
2	A1	Poros	29,24	NA
3	A2	Fisuras	28,85	NA
4	A2	Fisuras	28.76	NA
5	A3	Nidos de poros y rugosidad excesiva	112,74	NA
6	A3	Nidos de poros y rugosidad excesiva	108,32	<1
7	A3	Nidos de poros y rugosidad excesiva	35,29	<1
8	A3	Nidos de poros y rugosidad excesiva	121,58	<1
9	A3	Nidos de poros y rugosidad excesiva	37,48	<1
10	A3	Rugosidad excesiva	120,27 mm	NA
Zonificación	2020-R-07-VT-03-P5			



Nota: Se presenta el anexo 3-Tubería 5 para la identificación de las discontinuidades (De derecha a izquierda)

Identificación de Discontinuidades

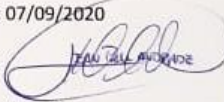
N° De Discontinuidad	ZONA	Tipo De Discontinuidad	Dimensión (mm)	Profundidad (mm)
1	A2	Zonas de traslape debido a un mal enfriamiento	153,24	NA
2	A1	Rugosidad Excesiva	137,41	NA

Nota:

Este informe tiene validez únicamente en su forma íntegra y original, no se permite la reproducción parcial o total de este documento, sin la autorización por escrita de LEND-EPN

OPERADOR: Ing. Santiago Camacho

Nivel: LÍQUIDOS PENETRANTES –ASNT NIVEL II

Laboratorio de Ensayos No Destructivos LAB-END	Cliente
Fecha: 07/09/2020 Firma: Ing. Santiago Camacho ASISTENTE DE ENSAYOS LEND ASNT Nivel II en Líquidos Penetrantes Firma: Ing. Verónica Sotomayor JEFE LEND ASNT Nivel II en Inspección Visual	Fecha: 07/09/2020 Firma:  Datos del Solicitante: Nombre: Jean Paul Andrade Bedoya Contacto: 099 6108186 Correo: @mail.com jean.andrade@epn.edu.ec

----- FIN DE INFORME -----
 ----- END OF REPORT -----